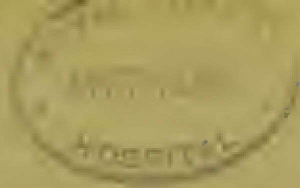


8.

Wann und warum sehen wir Farben?

Ein Beitrag zur Farbenlehre

von

KARL WEIDLICH



Buchdruckerei von J. J. Weber in Leipzig

1904

Inhalt.

Einleitung.

Es ist nahezu ein Jahrhundert her, daß Goethe seine Farbenlehre veröffentlichte und damit den Kampf gegen die noch heute von der Mehrzahl der Physiker als für allein der Wahrheit entsprechend und für unumstößlich bewiesen geltende Farbentheorie Newtons begann. Viele viele Jahre hatte Goethe der Sammlung von Versuchen und deren Ordnung gewidmet. Aber trotz der Enthüllungen, die er in seiner Farbenlehre über Newtons Farbentheorie brachte, und trotzdem auch ganz bedeutende Denker für seine Anschauungen eintraten, ist seine Lehre dennoch nicht zur Geltung gekommen, und die Jugend, auf die Goethe so sehr gehofft, wird heute noch genau wie ehedem in Newtons Theorie unterrichtet und so zu Anhängern dieser Lehre herangezogen.

Warum die Newtonsche Farbenlehre gegenüber allen anderen Anschauungen siegreich bleibt, ist bald gesagt. Es ist erstens der ihr untergelegte mathematische Beweis, der sie hält, und zweitens der Umstand, daß die anderen Lehren, auch die Goethesche, eigentlich mehr oder weniger nur Beschreibungen der Farbenerscheinungen, aber keine endgültigen Erklärungen für dieselben sind.

Der Verfasser hat sich nun vorgenommen, seine Ansichten über das fehlende „Wie“ zu äußern, sowie verschiedenes zu ergänzen.

Vor allem soll hier aber auch der sogenannte mathematische Beweis einmal gründlich und von anderer Seite beleuchtet werden.

Die Newtonsche Farbentheorie beruht auf der Annahme, daß weißes Licht aus farbigen Lichtstrahlen zusammengesetzt sei. Klinkerfues, der sich um die Theorie des Lichtes ausgezeichnete Verdienste erworben haben soll, so heißt es nämlich in Goedekes Einleitung zu Goethes Farbenlehre, schrieb zu eben dieser Einleitung eine populäre Skizze, in welcher er Newtons Farbentheorie entwickelt, und dem Verfasser sei gestattet, diese zum Teil hier anzuführen.

Es heißt dort: „Newtons Lehre beruht auf folgenden Anschauungen. Alle Gegenstände erscheinen uns, wenn sie überhaupt eine ihnen eigentümlich zukommende Wirkung auf unser Sehorgan ausüben, entweder schwarz oder weiß oder mit einem anderen der spezifischen Eindrücke, welche wir Farbe schlechthin und im weiteren Sinne zu nennen pflegen. Eine vollkommen spiegelnde Fläche oder ein vollkommen durchsichtiger Körper haben gar keine ihnen eigentümliche Farbe, sondern zeigen stets die Farbe der Gegenstände, welche man in dem Spiegel oder durch das durchsichtige Medium betrachtet. Unvollkommen spiegelnde Objekte oder unvollkommen durchsichtige Körper zeigen dagegen ebenfalls Farben, deren Natur von jener der Farben selbstleuchtender Körper nicht verschieden ist. In diesen drei Klassen, den selbstleuchtenden, den unvollkommen spiegelnden und den unvollkommen durchsichtigen Körpern, können sämtliche Objekte untergebracht werden. Eine rote Blüte z. B. ist ein unvollkommen spiegelnder Gegenstand, welcher von allem auf ihn fallenden Lichte nur rotes Licht weiterbefördert, eine blaue Flüssigkeit solche, welche nur blauen Strahlen den Durchgang gestattet, für Strahlen anderer Farben aber undurchsichtig ist. Ein Körper, welcher gar kein Licht weiterbefördert, also gar nicht auf unsere Netzhaut wirkt, erscheint dunkel oder schwarz, wie auch die farbigen Gegenstände bei mangelnder Beleuchtung schwarz erscheinen. Grau, worin nach dem optisch durchaus wahren Sprichwort nachts alle buntfarbigen Wesen erscheinen, ist nichts anderes als eine Mischung von Schwarz und Weiß. Das Schwarz kann aber, da es nur dem Zustande der Ruhe der Netzhaut des Auges entspricht, nicht als eine Farbe gelten; was wir Schwarz nennen, ist nur die Abwesenheit jedes Lichteindruckes. Sollen nun aber die mitgeteilten Annahmen eine haltbare Erklärung der verschiedenen Farben, welche wir im Tageslichte an den Gegenständen bemerken, abgeben, so muß nachgewiesen werden können, daß eben im Tageslichte, d. h. in dem über alle Objekte ausgegossenen weißen Sonnenlichte alle die verschiedenen Farben vorkommen. Wie wäre es sonst mit jener Annahme verträglich, daß die eine Blume rot, die andere gelb erscheint, da doch beide nur Tageslicht, nicht ihr eigenes Licht uns zusenden? Dieser Nachweis nun, daß in dem Weiß alle übrigen Farben, natürlich mit Ausnahme des Schwarz, welches gar keine physikalische Farbe ist, enthalten sind, ist, wie die Physiker stets anerkannt haben, auf eine sehr bindende

Weise geführt worden. Um das Experiment zu verstehen, das diesem Beweise zugrunde liegt, muß man aber notwendig beachten, daß die Licht aussendende oder zurückwerfende Fläche eines Körpers eine Gesamtheit von unzählig vielen Punkten ist. Die Gesamtwirkung aller dieser Strahlen kann von derjenigen der einzelnen Strahlen sehr verschieden sein. Man muß also notwendig, wenn man das in einem Strahle enthaltene Licht auf seine Beschaffenheit untersuchen will, diesen Strahl getrennt von den übrigen oder mit Ausschluß aller derjenigen, welche durch ihren Einfluß das Resultat der Untersuchung unzuverlässig machen können, analysieren. Es ist durchaus nichts weiter als die Beobachtung dieser ganz unerläßlichen Vorsichtsmaßregeln (wie sie sich selbst dem aufmerksamen Leser der Goetheschen Beiträge zur Optik aufdrängt), welche Newton die Anwendung ganz kleiner Lichtmengen, die durch feine Öffnungen in ein dunkles Zimmer dringen, in Anwendung bringen ließ. Betrachtet man einen solchen Strahl unter Abhaltung alles übrigen Lichtes durch ein Prisma, wobei die brechende Kante mit der Öffnung parallel ist, so bemerkt man, daß der Strahl das Prisma unter einer anderen Richtung verläßt, als unter welcher er in dasselbe eintrat. Den Winkel, welchen beide Richtungen miteinander bilden, nennt man die Ablenkung des Strahles. Stellt man den Versuch nacheinander mit allen verschiedenen Farben, welche man im Regenbogen findet, an, so zeigt sich, daß das Prisma jede dieser Farben ungeändert läßt, aber auch, daß die Ablenkung, welche der Strahl erfährt, bei übrigens gleichen Bedingungen für die verschiedenen Farben sehr verschieden ist. Die geringste Ablenkung erfährt immer das Rot, die stärkste das Violett; je näher am Rot im Regenbogen eine Farbe liegt, desto geringer ist die Ablenkung oder Brechung des Strahls. Betrachtet man endlich einen Spalt weißen Lichtes durch dasselbe Prisma, so erscheint die ganze Reihe der gefärbten Spalten nebeneinander mit der einer jeden Farbe zukommenden Ablenkung vom Rot bis zum Violett hin ineinander übergehend. Es ist die Erscheinung, die man Spektrum nennt. Man schließt daraus .mit Newton ganz sicher, daß der weiße Spalt gleichzeitig ein roter, ein orangefarbener, ein gelber Spalt bis zum violetten ist, oder mit anderen Worten, daß das, was wir ein vollkommenes Weiß nennen, nichts anderes ist als eine Vereinigung von allen Farben. Neben dieser Einsicht in die Natur des weißen Lichtes hat man aber auch noch andere Mittel gewonnen, die Farben als

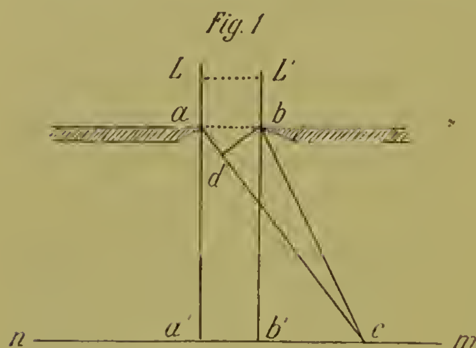
extensive oder meßbare Größen zu behandeln; denn man kann jede Farbe nach ihrer Ablenkung definieren, die sich in Graden, Minuten und Sekunden ausdrücken läßt; man kann den Nachweis führen, daß alle Farben in der Natur durch Mischung oder Zusammensetzung der unzerlegbaren Regenbogenfarben entstehen. Dies ist der wesentliche Inhalt der Newtonschen Farbenlehre, welcher in die neuere Theorie von der Verbindung des Lichtes übergegangen ist. Wenn man sich früher das Licht als eine sehr feine Materie dachte, welche von den leuchtenden Körpern emaniert oder emittiert würde, so ist etwa seit dem dritten Jahrzehnt des neunzehnten Jahrhunderts die Ansicht fest begründet worden, daß das Licht unserem Auge durch Schwingungen in einem äußerst feinen Medium vermittelt wird, wie der Schall dem Ohre durch Schwingungen der Luft. Diese Wellentheorie (auch Vibrationstheorie genannt) läßt die Farbe als vollkommenes Analogon der Tonhöhe erscheinen; wie bei dieser die höhere oder geringere Tonstufe durch die Anzahl der Schwingungen der Luftteilchen während einer Sekunde bestimmt wird, so bei der Farbe durch die Anzahl der Schwingungen eines Ätherteilchens in demselben Zeitraume. Rot entsteht, wenn ein Ätherteilchen in der Sekunde 450 Billionen Schwingungen macht. Violett bei 790 Billionen. Auch hier also ist die Farbe, und noch viel einfacher als vorhin, durch Zahlen zu bestimmen und auf extensive Größen zurückzuführen. Dies Zahlenverhältnis kann auch zur Berichtigung einer durch den ungenauen Sprachgebrauch veranlaßten Verwechslung des Begriffes der Lebhaftigkeit einer Farbe mit dem der Intensität oder Helligkeit dienen. Das Violett wird für weniger helles Licht gehalten als das Gelb, weil das Auge für jenes weniger empfindlich zu sein scheint. Aber das beruht auf Irrtum. Farbe und Intensität sind zwei voneinander gänzlich unabhängige Begriffe, ebenso wie die Höhe eines Tones und die Stärke, mit welcher er angeschlagen wird, sich nicht bedingen. So wenig man einer Saite einen höheren Ton abgewinnen kann, wenn man sie mit größerer Kraft in Schwingung setzt, ebensowenig nimmt ein Licht dadurch, daß man es dunkler oder heller macht, eine andere Farbe an. Es scheint aber, nicht zu verkennen, daß diese bei den Laien gewöhnliche, ja entschuldbare Verwechslung einen bedeutenden Einfluß in der Goetheschen Farbenlehre ausübt. Die Theorie, nach welcher die Farben sämtlich unter Mitwirkung von Hell und Dunkel entstehen sollen, scheint ein Ausfluß jener Verwechslung zu sein. Goethe selbst gesteht, von der Mathematik

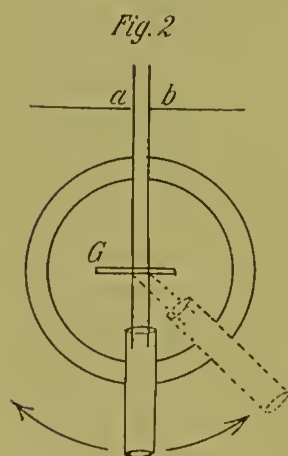
ganz zu abstrahieren, um die Phänomene an sich mit unbefangenem, gesundem Auge zu fassen, und schlägt jenen vom Könige Ptolemäus gewünschten Weg ein, obgleich nach der Antwort Euklids die Wissenschaft keinen besonderen Weg für Könige zu bieten hat. Auch die Könige auf geistigem Gebiete sind nicht günstiger bedacht, nehmen aber durch die sonstige Entwickelung ihrer Machtfülle zu leicht für den Glauben ein, daß sie auch da ihres Gegenstandes mächtig sein müssen, wo sie entschieden irren. Was bei den Männern der Wissenschaft längst feststeht, daß Goethes Theorie der Wissenschaft weder nützt, noch schadet, weil sie nicht wissenschaftlich begründet ist, oder begründet werden kann, das unterliegt bei seinen Verehrern noch Zweifeln. Es wäre unbillig von ihnen, die sich für Goethes Farbenlehre als die Leistung eines hochbegabten Geistes, der er selbst ein außerordentliches Gewicht beilegt, interessieren, genaue mathematische Kenntnisse zu verlangen; aber unerläßlich sind sie dem, der sich die Lehre von der Optik ganz zu eigen machen, oder wie Goethe reformieren will."

Durch die Anwendung der Mathematik in der Farbenlehre soll nun die Richtigkeit der Lehre Newtons unwiderlegbar bewiesen sein, und die meisten Physiker halten sie auch dafür. Wie aus dem Vorhergehenden zu entnehmen, denkt man sich, der Wellentheorie gemäß, die Fortbewegung des Lichtes durch Schwingungen in Wellenform und will durch Anwendung der Mathematik die Wellenlängen und die Schwingungszahlen der einzelnen Farben gefunden haben, und zwar soll Rot 450 Billionen, Violett 790 Billionen Schwingungen pro Sekunde machen. Von Rot durch Gelb, Grün, Blau bis zum Violett steigt somit die Schwingungszahl. Ein Lichtstrahl, der weniger Schwingungen macht als der rote, und ebenso ein Lichtstrahl, der mehr Schwingungen macht als der violette, erscheint dem Auge dunkel, d. h. wirkt nicht mehr auf die Empfindung des Sehorgans.

Es liegt nun die Frage nahe, welche Schwingungszahl hat ein weißer Lichtstrahl, und welche Schwingungszahl hat das auf der Nachtseite dem Grün gegenüberstehende Purpur, welche von dem Sehorgan doch beide sehr lebhaft empfunden werden? Hierüber dürften die Herren, welche so starr an der Drießellehre Newtons festhalten, noch gar nicht nachgedacht haben, denn sonst müßte ihnen der Irrtum ihres vermeintlichen mathematischen Beweises ja längst aufgefallen sein. Wie täuschend man die Mathematik dabei anzuwenden verstanden hat, wollen wir im nachstehenden sehen.

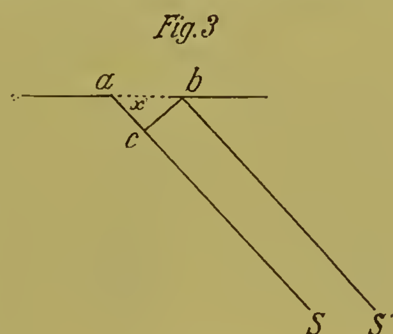
Das in Fig. 1 von LL' kommende Licht geht durch den Spalt $a\,b$ und trifft bei $a'\,b'$ die das Licht auffangende Fläche $n\,m$, woselbst sich das Bild des Spaltes in der Farbe des einfallenden Lichtes zeigt. Man lehrt nun, daß sich die einzelnen einfallenden Lichtstrahlen zwischen a und b alle in gleichem Schwingungszustande befinden, und denkt sich jeden Punkt auf der Linie $a\,b$ als die Quelle einer nach allen Richtungen kugelförmig sich ausbreitenden Strahlung. Nach der Wellentheorie besteht jede Strahlung in wellenförmigen Schwingungen, an denen man Wellenberge und Wellentäler unterscheidet. Treffen nun Strahlen mit gleichem Schwingungszustande zusammen, also derart, daß ihre Wellenberge oder ihre Wellentäler zusammenfallen, so verstärken sie sich, während bei einem Zusammentreffen von Wellenbergen mit Wellentälern der Effekt aufgehoben sein soll. Faßt man nun in Fig. 1 auf der auffangenden Fläche $n\,m$ den Punkt c ins Auge, so haben die Strahlungen, aus den Punkten a und b kommend, verschiedene Wege zurückzulegen, um nach c zu gelangen, und werden sich immer nur dort verstärken können, wo ihr Wegunterschied eine ganze Wellenlänge oder ein Vielfaches davon beträgt. Alle mit ungleichem Schwingungszustande zusammentreffenden Strahlen müssen sich dagegen, wie gelehrt wird, gegenseitig aufheben oder vernichten.





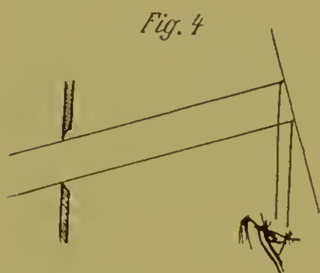
Auf dieser Annahme ist nun die Rechnung, mit der man die Wellenlängen farbiger Lichtstrahlen gefunden zu haben meint, aufgebaut. Läßt man nämlich das durch den engen Spalt $a\,b$ (Fig. 2) einfallende weiße Licht noch durch ein Gitter G hindurchgehen, und beobachtet man den Spalt mittels eines Fernrohrs, das auf einem um das Gitter drehbaren, mit einer Teilung versehenen Kreis befestigt ist, so erscheinen die durchfallenden Lichtstrahlen nur so lange weiß, als die verlängert gedachte Achse des Fernrohrs noch in den Spalt fällt. Entfernt sich aber das Fernrohr aus dieser Lage, indem es sich in der Richtung der Pfeile nach rechts oder links

bewegt, so erscheinen in ihm Farben, und zwar, wenn der Spalt enge genug ist, mit Violett beginnend das ganze Farbenband: Violett, Blau, Grün, Gelb, Orange bis Rot und kann man mittels der auf dem Kreise, mit dem sich das Fernrohr bewegt, angebrachten Teilung genau den Winkel ablesen, unter dem jede einzelne Farbe im Fernrohr erscheint, und mit diesem Winkel ist die eine Größe für die Interferenzrechnung gefunden. Von jedem Teilstrich oder Spalt im Gitter denkt man sich je ein Strahlenbündel ausgehend, und die durch das Fernrohr unter einem Winkel gesehenen farbigen Strahlen sollen aus ebenso vielen Strahlenbündeln bestehen, als Öffnungen in dem benützten Gitter vorhanden sind. Der geringen Breite dieser Gitteröffnungen halber (auf 1 mm kommen bis 800 Teilstriche) und der im Verhältnis hierzu großen Entfernung vom Gitter bis in das beobachtende Auge nimmt man die gebeugten Strahlenbündel bei der Rechnung unter sich als parallel an.



Beobachtet man die in Fig. 3 aus den nebeneinanderliegenden Gitteröffnungen a und b kommenden, unter dem Winkel x gebeugten Strahlenbündel S und S', und fällt man aus der Gitteröffnung b, in der das Strahlenbündel S' seinen Ursprung hat, eine Senkrechte auf das Strahlenbündel S, so ist die Entfernung von der Gitteröffnung a bis zu dem Punkte c, in dem die gefällte Senkrechte das Strahlenbündel S schneidet, der Gangunterschied der beiden Strahlen und für die sichtbare Farbe somit die Wellenlänge, deren Größe man aus dem Beugungswinkel x und dem bekannten Abstande zweier Teilstriche oder Öffnungen im Gitter leicht berechnen kann, da durch die gegebenen Größen Hypotenuse und einen daranliegenden Winkel alle Maße eines rechtwinkligen Dreiecks bestimmt werden. Hieraus ergibt sich nun aber auch, daß die Wellenlänge größer oder kleiner werden muß, wie die willkürlich angenommene Größe zwischen zwei Teilstrichen im Gitter größer oder kleiner wird, und daß somit ein mathematischer Beweis durch diese Rechnung nicht erbracht ist. Auch kann man die Farben Violett, Blau, Gelb und Rot unter anderen Winkeln sehen, wenn man anstatt des engen Spaltes eine weite Öffnung nimmt, in der man ein schmales dunkles Hindernis aufrichtet.

Beobachtet man dieses Dunkel des Hindernisses durch ein Gitter und Fernrohr genau wie vorher durch den engen Spalt das Helle, so wird uns das Gelb genau unter dem Winkel erscheinen wie dort das Violett, das Rot unter dem Winkel des Blau, Violett unter jenem des Gelb und Blau unter dem des Rot. An Stelle des Grün aber tritt hier ein schönes Purpur. Hier läßt uns der sog. mathematische Beweis nun ganz im Stiche. Die eigentliche Ursache dieser Farbenerscheinung wird noch später zur Sprache kommen; hier sei vorläufig nur gesagt, daß sie nicht auf der Interferenz von Lichtstrahlen, sondern auf der mehrfachen, über- oder hintereinander stattfindenden und sich dabei gleichzeitig stetig verschiebenden Reflexion eines Bildes beruht. Wäre die Interferenz Ursache der Farbenerscheinung, so müßte man die Farben auch bei Beobachtung einer gegen das Auge geneigten weißen Fläche wahrnehmen, ohne daß dieselbe ein Gitter sein müßte, wie in Fig. 4 angedeutet. Ein weiterer Irrtum ist der, daß man wie Newton immer wieder behauptet, ein roter Gegenstand werfe nur rotes, ein gelber nur gelbes und ein blauer Gegenstand nur blaues Licht usw. zurück. Man sehe sich doch einmal ein Gelb bei blauer und ein Blau bei roter Beleuchtung oder durch so gefärbte Gläser an. Man müßte farbenblind sein, wollte man sagen, daß der gelbe Gegenstand bei blauer Beleuchtung grau sei. Ein normales Auge hat ihn da noch jedesmal grün gesehen. Woher kam aber das Grün? Hier lassen uns die als so bedeutend gerühmten Physiker ebenfalls wieder im unklaren. Warum? Weil ihnen die Sache selbst ganz unklar war und zumeist auch geblieben ist. Wie sophistisch übrigens die Newtonsche Farbentheorie ausgebaut worden ist, ersieht man am besten aus der Stokesschen Regel über die Fluoreszenzfarben, wo es unter anderem heißt: „Untersucht man das von einem fluoreszierenden Körper ausgestrahlte Licht mittels des Prismas (Spektroskop), so findet man es zusammengesetzt, auch wenn das erregende Licht einfach ist.“



Man findet somit das reflektierte, einfache, homogene Licht zusammengesetzt, nachdem man zuvor mit allen möglichen Künsten bewiesen haben will, daß einfaches oder homogenes Licht nicht weiter zerlegt werden könne.

Die Hauptstütze dieser unhaltbaren Farbentheorie, gegen die schon unser großer Goethe, wenn auch ohne Erfolg zu erzielen, ankämpfte, war bisher der sogenannte mathematische Beweis; wir haben jedoch gesehen, daß dieser Beweis nicht Stich hält, und daß es sich bei demselben lediglich um eine täuschende Anwendung der an sich reinen Wissenschaft handelt.

Wir wollen uns nun eingehend mit der Frage beschäftigen, wie wir Farben empfinden können, und es wäre deshalb billig, daß wir mit einer Beschreibung unseres Sehorganes beginnen würden. Wir sparen uns dies aber für später auf und beginnen mit der Erklärung und linearen Darstellung der prismatischen Erscheinung, um später alles bequem überschauen zu können.

Die Farbenerscheinung durch ein Prisma

hervorgerufen, zeigt man immer in der Weise, daß man Licht durch eine möglichst kleine Öffnung gehen und auf ein Prisma fallen läßt, wodurch eine Änderung in der ursprünglichen Richtung und senkrecht zur Achse des Prismas eine Verbreiterung des einfallenden Lichtbildes veranlaßt wird. Das so verbreiterte Lichtbild besteht aus einer Reihe nebeneinanderliegender Farben, und zwar der Reihe nach aus Rot, Gelb, Grün, Blau und Violett, und ein solches Farbenband nennt man ein Spektrum. Nach der Newtonschen Farbentheorie behauptet man nun, daß das weiße Licht aus farbigen Lichtstrahlen von verschiedener Brechbarkeit zusammengesetzt sei. Läßt man daher einen weißen Lichtstrahl durch ein Prisma gehen, so muß sich derselbe aus Ursache der verschiedenen Brechbarkeit der farbigen Lichtstrahlen in so viele Farben zerlegen, als Brechbarkeiten in ihm enthalten sind.

Die Erklärung für das prismatische Farbenband scheint somit bei dieser Theorie sehr einfach gegeben zu sein und erweckt bei dem weniger tief in die Sache Eindringenden leicht die Überzeugung für ihre Richtigkeit. Sie ist und bleibt aber trotzdem ein Irrtum, der bei jeder weiteren Untersuchung auffallen muß. So wird z. B. für Gelb eine bestimmte Brechbarkeit behauptet. Läßt man aber gelbes Licht durch ein Prisma fallen, so erscheint nicht nur Gelb, sondern wieder ein ganzes Farbenband. Auch bei anderen Farben, die man als einfach oder homogen erklärt, tritt dieser Fall ein. Bei verschieden gefärbten

Stäben, die man in eine Flüssigkeit taucht, so daß sie dem Auge gebrochen erscheinen, müßte bei gleicher Lage der Stäbe die Brechung der verschiedenen Farben, wie es die Theorie verlangt, eine verschiedene sein. Wir konnten aber bisher eine solche Abweichung nicht bemerken, denn der rote Stab erschien uns, so oft wir den Versuch auch machten, genau unter dem gleichen Winkel gebrochen wie der violette Stab.

Wir ersehen hieraus, daß es somit nicht auf die Brechbarkeit der einzelnen Lichtstrahlen ankommt, und in folgendem soll nun gezeigt werden, **daß jede Farbe aus einem Verhältnisse von Hell und Dunkel, und zwar dann entsteht, wenn unser Auge das räumliche Hintereinander von Licht und Nichtlicht oder Hell und Dunkel unter einer Empfindung wahrzunehmen vermag.**

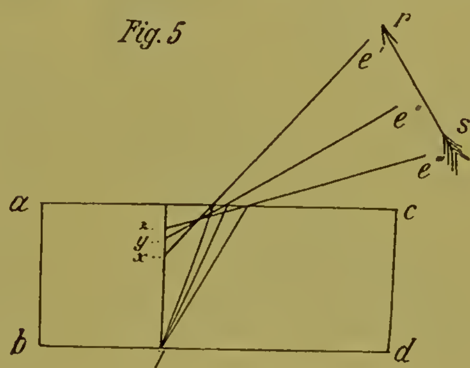
Um diesen Satz zu beweisen, müssen wir uns nun vor allen Dingen mit eben der Eigenschaft des Lichtes, die man Brechung oder Refraktion nennt, genau vertraut machen, weil wir vermöge dieser Eigenschaft das Nebeneinander von Bildern, unter Vervielfältigung jedes einzeln gesehenen Punktes, in ein Über- oder Hintereinander verwandeln und als solches beobachten können.

Läßt man in ein leeres Gefäß ein Licht schräg in der Diagonale hineinscheinen, so daß wohl die dem Lichte gegenüberstehende Wandung, nicht aber der Boden beleuchtet wird, und gießt man in dieses Gefäß alsdann Wasser, so bemerkt man, daß sich das Licht gegen die Seite, von der es herkommt, zurückzieht und nun einen Teil des früher beschatteten Bodens beleuchtet. Die Lichtstrahlen weichen an dem Punkte, wo sie in das Wasser eintreten, von ihrer geradlinigen Richtung ab und erscheinen daselbst gebrochen. Es ist dies die objektive Erscheinung, die man unter dem Namen Brechung kennt.

Man kann aber diese Erscheinung auch durch den subjektiven Versuch kennen lernen, indem man an Stelle des vorher wirkenden Lichtes das Auge setzt und in der Richtung der Diagonale in das Gefäß sieht, und zwar so weit, daß man wohl die gegenüberliegende Wandung, nicht aber den Boden sehen kann. Gießt man darauf Wasser in das Gefäß, so wird das Auge sofort auch einen Teil des Bodens erblicken, der jetzt gleichsam gehoben zu sein scheint, weshalb man diese subjektive Erscheinung auch mit dem Namen Hebung bezeichnet.

Bei beiden Versuchen tritt eine Änderung in dem Bezuge der Gegenstände ein, indem dieselben von anderer Stelle zu wirken scheinen, als

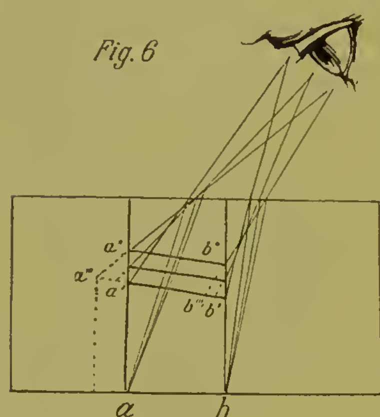
wo sie sich tatsächlich befinden, oder an einer anderen Stelle als dieser gesehen werden. Gleichzeitig tritt aber auch, infolge davon, daß der Winkel, in dem ein Lichtstrahl gebrochen wird, immer größer wird, je schräger der Lichtstrahl auf die Fläche auffällt, je weiter sich derselbe also von der auf die Fläche senkrechten Richtung, in der die Brechung gleich null ist, entfernt, eine Vervielfältigung jedes einzelnen gesehenen Punktes ein oder mit anderen Worten, jeder Punkt wird infolge des sich ändernden Brechungswinkels nicht nur an einem Orte, sondern an mehreren Orten zugleich gesehen. Beobachtet man einen Punkt *l*, zwischen dem und unserem Auge sich ein durchsichtiges Mittel, sei es nun Glas, Kristall oder irgend eine Flüssigkeit befindet, so werden, nachdem der Punkt nicht nur nach einer, sondern nach allen Richtungen Lichtstrahlen aussendet, diese beim Austritt aus dem Mittel an der Fläche *ac* unter verschiedenen Winkeln gebrochen, und unser Auge sieht den Punkt *l* nun in der Richtung der austretenden Strahlen, und zwar an den Stellen, wo die Sehlinie oder die Verlängerungen der austretenden Strahlen die von *l* auf die Fläche *ac* gefällte Senkrechte schneiden. Das Auge sieht daher den Punkt *l* nun zu gleicher Zeit an verschiedenen Orten, und zwar so oft, als die Pupille in der Richtung des Pfeils *rs* Strahlen zu fassen vermag.



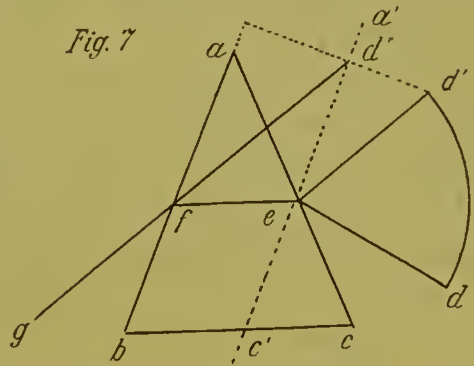
Auch jeder neben *l* sich befindende Punkt sendet genau ebenso viele Strahlen in unser Auge, und diese erscheinen uns nun, je nachdem sie rechts oder links von *l* unserer Zeichnung sich befinden, hinter oder vor den Bildern dieses Punktes. Da nun alle Bilder aus einem Nebeneinander von Punkten bestehen, und weil wir nebeneinanderliegende Punkte unter Umständen hintereinander zu sehen vermögen, so können wir selbstverständlich auch Bilder in dieser Weise sehen. Unter Bild verstehen wir im allgemeinen ein durch Unterschied in der Farbe oder durch Abwechslung von Hell und Dunkel begrenzt Gesehenes. Beobachten wir eine unbegrenzte Fläche durch ein brechendes Mittel, so werden wir innerhalb derselben keine Farbe entstehen sehen, weil das durch die Brechung auch hier veranlaßte Hinter- und Übereinander der einzelnen Punkte keinen Unterschied von Hell und Dunkel bringt. Veranlassen wir dagegen

durch ein brechendes Mittel ein Hinter- bzw. Übereinander von Hell und Dunkel durch Verschiebung eines begrenzt Gesehenen, so entstehen an und über den Grenzen des Gesehenen sofort Farben, und zwar Blau in Violett übergehend, wenn ein Helles über einem dunkeln, und Rot in Gelb übergehend, wenn ein Dunkles über einem hellen Grunde gesehen wird. Ist das Bild sehr schmal, so daß sich die farbigen Ränder erreichen können, so entsteht, wenn das Bild hell ist, durch das Übereinandertreten von Gelb und Blau Grün, bei einem dunkeln Bilde durch Violett über Rot Purpur.

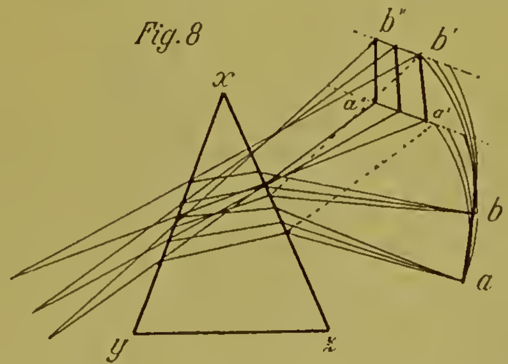
Aus Fig. 6 ist ersichtlich, in welcher Weise sich ein helles Bild, das sich auf einem dunkeln Grunde befindet, samt dem Grunde vervielfältigt und übereinandergeführt gesehen wird. Es erscheint dabei dort, wo das helle Bild über den dunkeln Grund tritt a' nach a'', welch letzteren Punkt wir bei a''' zu sehen meinen, wie oben gesagt, Blau und Violett, bei b' nach b'', dieses scheinbar in b''' gesehen, wo der dunkle Grund über dem hellen Bilde gesehen wird, Rot und Gelb. Der Verfasser hatte außer an anderen Orten des öfteren Gelegenheit, diese Farbenerscheinung im Hofe des Münchener Hofbräuhauses zu beobachten, wenn rasch aufräumende Gäste weiße Teller in den dort aufgestellten Brunnen geworfen hatten, um den Brunnenrand frei zu bekommen. Die farbigen Säume, durch das Weiß der Teller auf dem dunkeln Grunde des Brunnens begünstigt, waren stets sehr deutlich und lebhaft und erschienen sofort, wenn man in schräger Richtung in das Wasser blickte. Auch an Teichen und Flüssen, wenn sich weiße Scherben von dem dunkeln Grunde derselben abheben, hat man oft Gelegenheit, diese Erscheinung zu beobachten. Die Ursache bleibt immer dieselbe, daß Bilder durch die verschieden gebrochenen, in das Auge gelangenden Strahlen vervielfältigt und übereinandergeführt werden. Wir kennen damit die Bedingungen, unter denen uns diese farbigen Säume erscheinen, und es wird uns daraus klar, daß wir die Säume bedeutend verbreitern und die Farben somit besser sehen können, wenn die entstehenden Bilder mehr übereinander verschoben, mehr verrückt werden. Dies erreichen wir am besten durch Mittel mit ebenen, jedoch gegeneinandergeneigten



Flächen, deren Basis ein Dreieck bildet, durch Prismen. In Fig. 7 ist nun der Vorgang, wie wir einen Punkt durch ein Prisma sehen, dargestellt. Die von *d* ausgehenden Lichtstrahlen erfahren bei dem Durchgange durch das Prisma *a*, *b*, *c* eine zweimalige Richtungsänderung und erscheinen dem Auge auch hier wieder an der Stelle, wo die Verlängerung der Linie, in der wir den Punkt sehen und die auf die Ebene *a b* gefällte Senkrechte sich schneiden. Wir müssen hierbei aber berücksichtigen, daß wir die Senkrechte nicht in *d* errichten dürfen, weil eine zweimalige Brechung an gegeneinander geneigten Flächen stattgefunden hat, sondern dort, wo sich der Punkt *d* befinden müßte, wenn wir sein Bild durch ein Mittel mit parallelen Flächen an der gleichen Stelle wie durch das Prisma sehen wollten. Diesen Punkt finden wir, wenn wir durch *e* zu der Linie *g f*, in deren Verlängerung wir *d* sehen, eine Parallele ziehen und auf diese aus *d* um *e* als Mittelpunkt einen Zirkel schlagen.



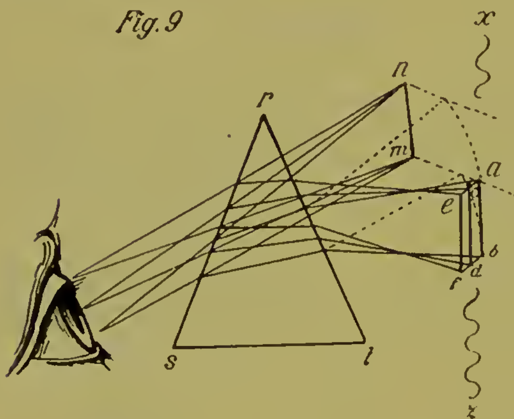
Der Schnittpunkt *d'* ist dann der Punkt, aus welchem die Senkrechte auf *a b* gefällt wird, und wir finden die Stelle, in welcher wir *d* durch das Prisma in der Richtung *g f* sehen, in *d''*. Die einzelnen von *d* ausgehenden und auf den Ebenen *a c* und *a b* gebrochenen Strahlen gehen uns aber, infolge der mit der Schrägheit der auffallenden Lichtstrahlen zu- und abnehmenden Brechungswinkel, stets von anderen Stellen zu, und wir erhalten hier abermals eine Vervielfältigung jedes gesehenen Punktes, und da sich in jeder Richtung zugleich auch die Entfernungen zu unserem Auge ändern, bei Bildern ein Über- bzw. Hintereinander derselben.



Beobachten wir in Fig. 8 das Bild *a b* durch das Prisma *x y z*, so sehen wir dieses Bild samt seinem Grunde vervielfältigt in *a' b'* nach *a'' b''* verschoben, und es entsteht bei einem hellen Bilde auf dunkelm Grunde von *b'* nach *b''*, weil Helles über Dunkles tritt, Blau und Violett, von *a'*

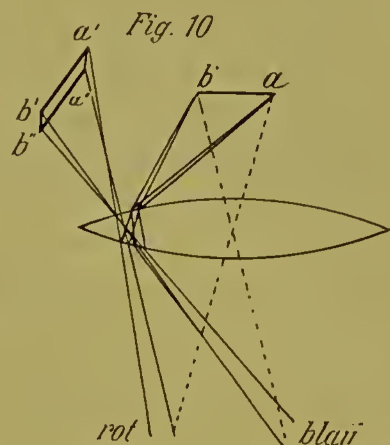
nach *a''*, wo Dunkles über Hellem gesehen wird, Rot in Gelb übergehend. Ist das Bild schmal, und sind die farbigen Säume, welche durch die Verschiebung hervorgerufen werden, genügend breit, so daß *a''* noch über *b'* erscheint, so entsteht dort, weil Gelb über Blau tritt, Grün. Bei einem dunkeln Bilde auf hellem Grunde tritt im gleichen Falle Violett über Rot, und es entsteht dabei ein Purpur.

Wir ersehen hieraus abermals, was wir schon oben gesagt haben, daß jede Farbe aus einem Verhältnis von Hell und Dunkel, und zwar dann entsteht, wenn unser Auge das räumliche Hintereinander von Licht und Nichtlicht oder Hell und Dunkel unter einer Empfindung wahrzunehmen vermag.

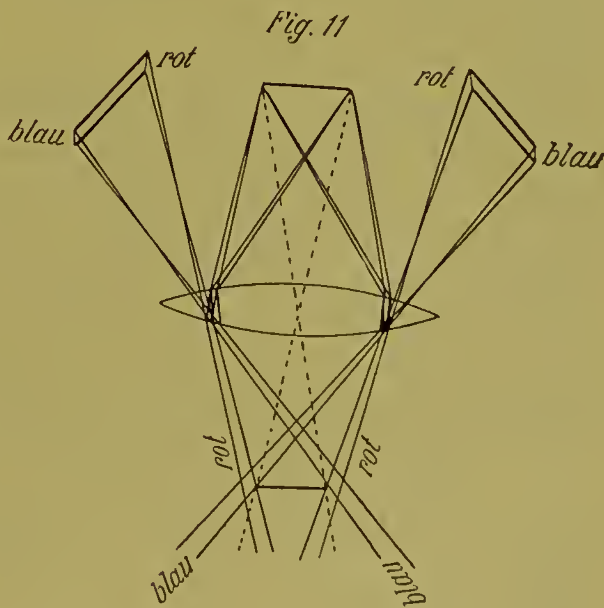


Die objektive Erscheinung der prismatischen Farben ist nun nichts anderes als die Reflexion der subjektiv direkt gesehenen Bilder. Auf einer spiegelnden Fläche werden wir dies sehr deutlich gewahr, da uns die Erscheinung dann nur in einer durch die regelmäßige Reflexion bestimmten Richtung und genau wie bei dem subjektiven Versuche entgegentritt. Eine rauhe Fläche dagegen können wir uns aus lauter winzigen Konkav- und Konvexspiegelchen zusammengesetzt denken, so daß uns in jeder Richtung ein Teil der darauffallenden Strahlen reflektiert werden muß. In den kleinen Erhebungen und Vertiefungen einer rauhen Fläche ziehen sich die davon wiedergegebenen Bilder, oder Teile von solchen wie in Spiegeln mit stark gekrümmter Oberfläche zusammen, und das aus den vielen kleinen Bildern bestehende Gesamtbild, das wir bei dem subjektiven Versuche durch das Prisma direkt gesehen haben, erscheint mit seinen Farben nicht mehr hinter, sondern auf der reflektierenden Fläche. Betrachten wir nun weiter ein durch ein Prisma entstandenes und uns von einer Fläche reflektiert entgegenkommendes Farbenband durch ein zweites Prisma, so sehen wir, wie sich das Farbenband oder Spektrum wieder auf das ursprünglich wirksame Bild zurückführen läßt.

Diesen Vorgang stellt uns Fig. 9 dar. Die von der unvollkommen spiegelnden Fläche *xz* reflektierten Strahlen der durch eine vorangegangene Brechung übereinander verschobenen Spiegelbilder *ab* bis *cd* bis *ef* kommen durch das Prisma *rst* gebrochen in das beobachtende Auge, welches nun die durch die objektive Brechung in *a* bis *e* und *b* bis *f* vervielfältigt gesehenen Punkte des ursprünglichen Bildes unter Aufhebung der Farbenerscheinung in *nm* wieder vereinigt erblickt.



In gleicher Weise wie bei den Prismen entstehen auch die Farben, die wir bei Versuchen mit Linsen beobachten können. Die Farbenerscheinung zeigt sich besonders an den Rändern der Linsen, und die Ursache hierfür ist abermals die, daß wir Bilder übereinander geschoben sehen, weil jeder einzelne Punkt des Bildes *ab* infolge der gegen die Ränder der Linse zu immer größer werdenden Brechungswinkel nicht nur von einem, sondern zugleich von verschiedenen Orten zu wirken scheint. Nach den bekannten Gesetzen sehen wir somit bei *a′a″*, weil Dunkel über Hellem gesehen wird, Rot in Gelb übergehend, bei *b′b″*, wo das Helle sich über dem Dunkeln zeigt, alle Schattierungen von Blau bis Violett.



Durch Fig. 11 sei noch ersichtlich gemacht, warum ein durch eine Linse kommender Lichtkegel, ehe sich die Strahlen wieder zu einem Bilde zusammenschließen, rot, hinter dem Bilde aber blau gesäumt erscheint. Die Versuche mit Linsen bestätigen uns abermals, daß die Farben aus der Hintereinanderfolge von Hell und Dunkel entstehen.

Farben durch trübe Mittel hervorgerufen.

Wir gehen nun zu den Farben über, die zu beobachten wir so oft in freier Natur Gelegenheit haben, dem Blau des Himmels, dem Rot der untergehenden Sonne und anderen ähnlichen Erscheinungen. Auch bei diesen muß Helles über Dunkles oder Dunkles über Helles treten und als Hintereinander auf unser Auge wirken, wenn Farbe gesehen werden soll.

Nun können wir aber ein solches Hintereinander nur dann sehen, wenn das vor dem Hintergrunde Befindliche durchsichtig ist, und dieses wiederum ist nur dann für uns sichtbar, wenn es selbst Lichtstrahlen aussendet oder solche reflektiert. Aus diesen Bedingungen ergibt sich, daß das vor dem Hintergrunde Befindliche weder vollkommen durchsichtig noch undurchsichtig sein darf, welche Eigenschaften wir in dem Trüben vereinigt finden.

Die Trübe an sich kann nur farbig oder farblos sein. Für uns kommt vorläufig nur die farblose Trübe, das ist eine solche, welche uns darauffallende Lichtstrahlen in bezug auf deren Farbe unverändert wieder zugehen läßt, in Frage.

Das Sonnenlicht, das Licht elektrischer Bogenlampen, Magnesium- und Azetylenlicht usw. ist, wenn es uns ungetrübt zukommt, blendend und farblos. Sehen wir aber solches Licht durch ein trübendes Mittel, so erscheint es uns gelb, welche Farbe bei zunehmender Trübe oder größerer Tiefe des trüben Mittels sich bis in das Rubinrote steigert.

Sehen wir dagegen durch ein trübes, von einem darauffallenden Lichte erleuchtetes Mittel, die Finsternis, so erscheint uns eine blaue Farbe, welche bei vermehrter Trübe immer blässer, bei zunehmender Durchsichtigkeit des Trüben aber immer tiefer blau, bis in das Violette gesteigert wird.

Wir können diese Erscheinung sowohl subjektiv wie auch objektiv beobachten, letzteres dann, wenn uns die subjektive Erscheinung von einer rauhen Fläche, also unvollkommen gespiegelt entgegenkommt. Von den Fällen, bei denen uns diese Farben erscheinen, wollen wir hier nur die wesentlichsten anführen. Es gehört in erster Reihe das Morgen- und Abendrot hierher. Das unter- oder aufgehende Bild der Sonne am Horizonte durch die Dünste der Atmosphäre gesehen, erscheint rot. Steigt dann die Sonne höher, so wird die Tiefe des trüben Mittels vermindert, das Rot geht allmählich in ein Gelb und schließlich in ein reines blendendes Weiß über. Auch wenn wir die Sonne durch

die Rauchwolke eines Schornsteins oder durch die über den Städten liegenden Dünste sehen, erscheint uns dieselbe je nach dem Grade der Trübe gelb oder rot, und aus gleichem Grunde sehen auch die Wüstenreisenden die Sonne blutrot, wenn der gefürchtete Samum das Tageslicht durch die mit feinen Staubmassen geschwängerten Lüfte trübt.

Die Finsternis des unendlichen Raumes dagegen sehen wir durch die von der Sonne beleuchtete Trübe der Atmosphäre in blauer Farbe. Nahe dem Horizonte erscheint der Himmel immer blässer, weil in dieser Richtung die Tiefe des trüben Mittels vermehrt wird und sich allmählich dem Weißen nähert. Der Zenit dagegen erscheint uns besonders auf hohen Bergen und an reinen klaren Tagen tiefkönigsblau.

Auch das Dunkel ferner Wälder erscheint uns in blauer Farbe, weil die zwischen dieselben und das Auge tretenden beleuchteten Dünste diese Farbe bedingen.

Man hat die blaue Farbe des Himmels immer einer blauen Eigenschaft der Luft zuschreiben wollen, doch ist diese Annahme unhaltbar, denn die Luft an sich ist farblos. Wäre sie blau, dann müßte ja der Himmel am Horizonte und nicht im Zenit am tiefsten blau sein, und auch das Sonnenlicht müßte uns beim Auf- und Niedergange diese Farbe wie durch ein blaues Glas zugehen lassen. Daß auch bei dem Blau entfernt gesehener Wälder eine blaue Eigenschaft der Luft nicht in Frage kommt, kann man besonders schön in den Alpen beobachten, wo die beschneiten Gipfel der Berge neben jenem Blau der Wälder stets weiß, ja sogar eher in das Gelbe als in das Blaue spielend gesehen werden.

Das Blau, das wir an dem unteren Teile von Spiritus- und Kerzenflammen bemerken, gehört ebenfalls hierher. Es erscheint uns am schönsten vor einem dunkeln Hintergrunde und verschwindet fast gänzlich, wenn wir an dessen Stelle ein weißes Blatt Papier setzen, so daß die leuchtende Trübe vor einem hellen Grunde gesehen wird.

Gleichfalls hierher gehören ferner die Erscheinungen, die man an mehr oder weniger trüben Mitteln wahrnimmt und mit dem Namen Fluoreszenz bezeichnet.

Bei dieser tritt genau in derselben Weise eine Änderung der Farbe ein, je nachdem sich das Mittel als Dunkles vor einem hellen oder als Helles vor einem dunkeln Grunde befindet. Von den prismatischen Versuchen her wissen wir, daß uns die Farben von Gelb bis Rot dann erscheinen, wenn wir ein Dunkles mit und über einem Hellen sehen,

Blau bis Violett jedoch umgekehrt, wenn ein Helles mit und vor einem Dunkeln gesehen wird. Diese Regel gilt für alle Fälle, in denen wir Farben von außen kommend wahrnehmen, und auch die mehr oder weniger durchsichtigen Mittel erscheinen, wenn ihnen eine Farbe eigen ist, nach diesem Gesetze gefärbt.

Der Unterschied zwischen fluoreszierenden und chemischen Farben läßt sich nur aus der Verschiedenheit des dabei vorkommenden Dunkels erklären, denn die Art und Weise, wie sich diese Eigenschaft an dem Körperlichen zeigt, kann zweierlei Art sein. Das eine Dunkel, durch die reine Trübe veranlaßt, können wir auch Schatten nennen. Es zeigt sich niemals beim auffallenden, sondern immer beim durchfallenden Lichte. Das andere Dunkel hingegen bezeichnen wir als Schwarz und verstehen darunter die Eigenschaft des Körperlichen, darauffallende Lichtstrahlen nicht zu reflektieren, sondern in Wärme umzusetzen. Es zeigt sich dieses Dunkel deshalb nicht nur beim durchfallenden, sondern auch beim auffallenden Lichte.

Bei fluoreszierenden Farben haben wir uns nun ein Schattiges, ein an dem Trüben entstehendes Dunkel, bei den chemischen Farben ein mehr oder weniger körperliches Schwarz als durch die Farbenerscheinung bedingtes Dunkel zu denken, und bei unseren mehr oder weniger trüben fluoreszierenden Mitteln verändert sich die Farbe mit dem durch dieselben gesehenen Grunde, sie fluoreszieren, weil die Trübe einmal bei durchscheinendem Lichte als Dunkles vor einem hellen, das anderemal bei darauffallendem Lichte als Helles vor einem dunkeln Grunde erscheint. Inwieweit dabei den trüben Mitteln eigene chemische Farben mitwirken und die Farbe modifizieren, wäre vielleicht mit Hilfe des Spektroskops zu ermitteln.

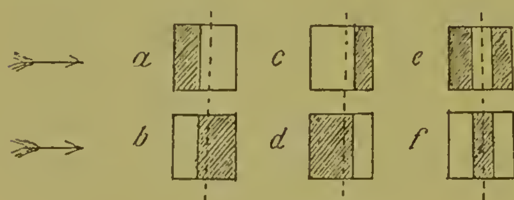
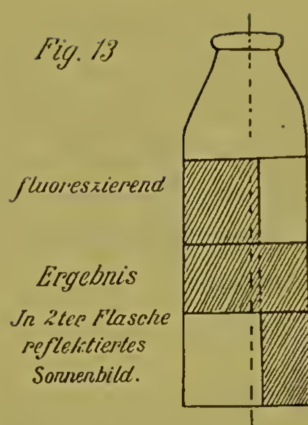


Fig. 12

In Fig. 12 ist das Hintereinander der durch fluoreszierende Mittel gesehenen Farben, oben bei hellem Grunde und nicht beleuchtetem Mittel, unten bei dunkelm Grunde und beleuchtetem Mittel dargestellt, und zwar in *a* Gelb zeigend und sich in *b* in Blau umkehrend wie Petroleum, *c* Blau zeigend, sich in *d* in Orange umkehrend wie eine Lackmuslösung und *e* Grün, beim darauffallenden Lichte und dunkelm Grunde in *f* Rot werdend, wie das Blattgrün fluoresziert.

Daß das bereits durch eine Flasche Petroleum gegangene Sonnenlicht die blaue Erscheinung auf einer zweiten Flasche mit Petroleum nicht mehr hervorzubringen vermag, ist sehr erklärlich,da das auf der zweiten Flasche reflektierte Sonnenbild das Dunkel des trüben Mittels vor der Sonne im Vordergrunde hat, so daß das Helle, durch welches die blaue Farbe hervorgerufen wird, mit dem Dunkeln, der dunkle Hintergrund aber mit dem Hellen des reflektierten, aber durch die erste Flasche Petroleum schon getrübten Sonnenbildes zusammenfällt.



Nachdem wir uns mit den Bedingungen, unter denen uns Farben erscheinen, vertraut gemacht haben, gehen wir nun zu den

„Physiologischen Farben“

über und beschäftigen uns hier besonders mit der Einrichtung unseres Sehorgans, durch die es befähigt ist, Lichteindrücke wahrzunehmen und Farben zu empfinden.

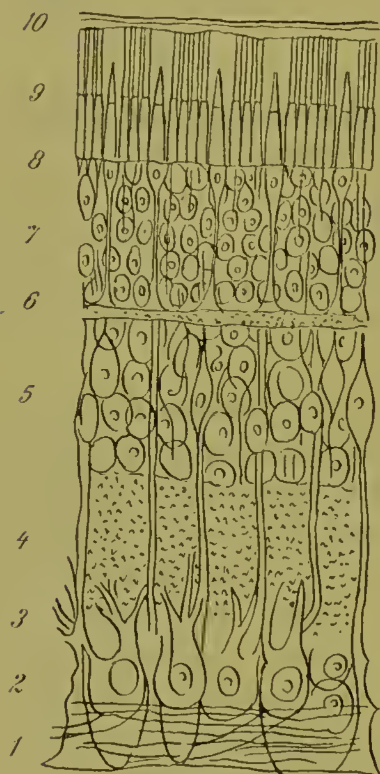
Von den verschiedenen Teilen des Auges wenden wir unsere Aufmerksamkeit vorzüglich der Linse und der innersten der Augenhäute, der Netzhaut zu. Erstere überträgt die Bilder der Licht aussendenden Gegenstände auf die Netzhaut und ist, um aus jeder Entfernung ein scharfes Bild zu geben, mit einem Mechanismus versehen, der die Krümmung der Linse in entsprechender Weise reguliert. Außerdem besitzt das Auge noch die Fähigkeit, durch Erweitern oder Zusammenziehen der Pupille sich wechselnden Lichtstärken anzupassen, um die Netzhaut vor zu starkem Lichtreize zu schützen und gleichzeitig störende Randstrahlen abzublenden.

Den Augenhintergrund, auf den die Linse die Bilder der Außenwelt überträgt, bildet die Netzhaut, welche sich aus den Verzweigungen des Sehnervs, dessen Anhanggebilden und einer schwammartigen Stützsubstanz zusammensetzt.

Ihr Bau ist ein sehr verwickelter, und ein zu ihrer Ausbreitung senkrecht ausgeführter Schnitt läßt bei starker mikroskopischer Vergrößerung deutlich zehn verschiedene Schichten erkennen. Die nebenstehende Zeichnung zeigt uns die Reihenfolge dieser Schichten von innen nach außen, und zwar bei 1 die innere Begrenzungsschicht, 2 die Nervenfaserschicht, 3 die Ganglienzellenschicht, 4 die innere Körnchenschicht,

5 die innere Körnerschicht, 6 die äußere Körnchenschicht, 7 die äußere Körnerschicht, 8 die äußere Begrenzungsschicht, 9 die Schicht der Stäbchen und Zapfen und 10 die Pigmentschicht. Man kann das Ganze als ein durchlöchertes Bindegewebe auffassen, in dessen Lücken die nervösen Elemente des Sehnerven eingelagert sind. Die beiden Begrenzungsschichten bestehen ganz aus Stützsubstanz, und die äußere ist zum Zwecke des Durchtrittes der nervösen Elemente netzartig durchbrochen. Die am weitesten nach außen gelegenen Stäbchen und Zapfen stehen mit den Sehnerven durch die Ganglienzellen in Verbindung, welche mehrere, sich in äußerst feine Fäden teilende Ausläufer in die innere Körnchenschicht senden, durch die sie mit den inneren Körnern in Fühlung treten. Diese wiederum stehen mit den äußeren Körnern und dadurch weiter mit der Schicht der Stäbchen und Zapfen in Verbindung. Die Stäbchen- und Zapfenschicht besteht aus dicht nebeneinander befindlichen nervösen Elementen von zweierlei Art, und zwar sind die einen kürzer und dicker, Zapfen geheißen, die anderen länger und schmäler, Stäbchen genannt. Sie bilden die letzten nervösen Anhanggebilde des Sehnerven und sind als die Angriffsstellen des Lichtreizes zu betrachten, indem das Licht eigentümliche Veränderungen an ihnen bewirkt, welche durch die mit ihnen in Verbindung stehenden Fasern des Sehnerven weitergeleitet und zu unserem Bewußtsein gebracht werden.

Fig. 14



Man hat bisher der Pigmentschicht, auch Sehpurpur geheißen, immer großen Anteil an der Gesichtsempfindung zugeschrieben, indem hier chemische Prozesse dergestalt stattfinden sollen, daß der den Sehpurpur bildende Farbstoff durch Beleuchtung gebleicht, bei Dunkelheit dagegen wiederhergestellt wird. Diese Annahme beruht aber nur auf einer Täuschung, da Hühner und Tauben z. B. auch ohne die Pigmentschicht sehr gut sehen, und auch unsere Gesichtsempfindung besteht allein aus

den Eindrücken, die durch Reize, auf die Stäbchen und Zapfen ausgeübt, hervorgerufen werden.

Der Lichtreiz oder auch ein Reiz, durch Druck, Schlag oder Stoß verursacht, bewirkt in den Stäbchen und Zapfen einen größeren Blutandrang, durch den erstere verlängert, letztere aber verdickt und verkürzt werden. Verlängern sich nun die Stäbchen, so treten die weißen Enden ihres Tastkörpers nach außen und werden auf der Pigmentschicht sichtbar, wodurch der Eindruck erweckt wird, als ob die Pigmentschicht tief in die Stäbchen und Zapfenschicht eingedrungen und der Sehpurpur gebleicht worden wäre. Auf Seite 14 haben wir festgestellt, daß wir Farben dann sehen, wenn unser Auge das räumliche Hintereinander von Licht und Nichtlicht oder Hell und Dunkel unter einer Empfindung wahrzunehmen vermag, und die Einrichtung unseres Sehorganes bestätigt nun die Richtigkeit dieser Anschauung, indem sie uns zeigt, daß das Auge durch die Anordnung der zwei verschiedenen in erregtem Zustande sich in entgegengesetzten Richtungen bewegenden Empfindungselemente auch befähigt ist, das von außen kommende Hintereinander aufzunehmen und zu übertragen. Die von Helmholtz und von Häring aufgestellten Theorien der Farbenempfindung sind schon deshalb unhaltbar, weil sie mehrerlei nervöse Elemente bedingen, als unser Auge wirklich besitzt. Helmholtz verlangt drei, Häring gar viererlei verschieden empfindende Elemente.

Durch die Anordnung von Stäbchen und Zapfen ist unser Auge vollkommen befähigt, das Hintereinander der durch die Linse auf der Netzhaut entworfenen Bilder zu analysieren und durch die verschiedene Art der Erregung in diesen oder jenen Elementen und deren gegenseitiges Verhältnis die Empfindung jeder Farbe zu übertragen.

In der Finsternis befinden sich sowohl Stäbchen wie Zapfen im Zustande der Ruhe, und wir bezeichnen das, was diesen Ruhezustand hervorbringt oder gestattet, als Dunkelheit, auf das Körperliche bezogen als Schwarz. Fällt dagegen weißes, d. h. reines ungetrübtes Licht in unser Auge, so übt dasselbe einen Reiz auf die Stäbchen und Zapfen aus, und es strömt denselben mehr Blut zu, wodurch erstere sich verlängern und vorschieben, letztere dagegen sich verdicken und zurückziehen, gleichsam tastend, ob das Helle nicht durch ein vor oder hinter ihm befindliches Dunkel begrenzt sei. Ist diese Erregung eine sehr schwache, so haben wir die Empfindung des Grauen.

Um Farben zu sehen, bedarf es, wie bereits früher gesagt, eines zu gleicher Zeit unter dem Eindrucke einer Empfindung gesehenen Hintereinander von Hell und Dunkel, das durch die Linse in verkleinertem Maßstabe auf die nervösen Elemente übertragen wird. Kommt ein Dunkles vor einem Hellen auf die Netzhaut, so hindert das mehr oder weniger rückwärts auf die Zapfen fallende Dunkel diese daran, sich trotz des auf die Enden von deren Tastkörper wirkenden Reizes zurückzuziehen, oder gestattet es nur in beschränkter Weise. Diese Beschränkung der Zapfen, sich nicht dem Reize entsprechend genügend zurückziehen zu können, während die Stäbchen sich unbehindert vorschieben, gelangt als Empfindung des Gelben zu unserem Bewußtsein. Schreitet das Dunkel noch weiter vor, so wirkt der Lichtreiz vorzugsweise nur noch auf die äußeren Enden der Stäbchen, und wir haben die Empfindung des Roten. Ein Helles vor einem Dunkeln gesehen verursacht dagegen umgekehrt eine größere Erregung in den Zapfen, da in diesem Falle das Dunkel auf die Enden der Stäbchen fällt und diese trotz eines von ihnen noch empfundenen Reizes mehr oder weniger behindert sind, sich zu verlängern, denn je weiter sie sich vorschieben, desto geringer wird der Reiz, weil der Tastkörper in das Dunkel greift. Wir empfinden diese Beschränkung der Stäbchen, sich trotz des Reizes nicht genügend verlängern zu können, als Blau, welches tiefer oder dunkler wird, je weiter das Dunkel nach innen zu fortschreitet. Sobald das Dunkel bis an die Tastkörper der Zapfen herantritt und auf diese Einfluß ausübt, haben wir die Empfindung des Violetten.

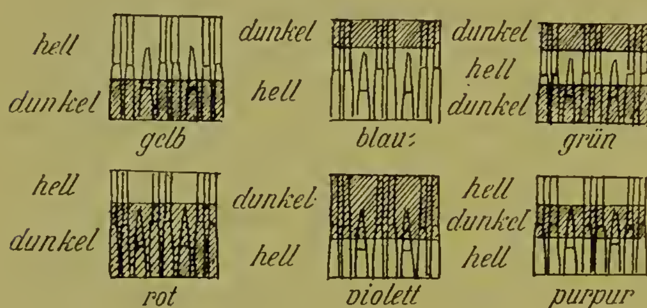


Fig. 15

Es kann nun weiter der Fall eintreten, daß wir die Empfindungen des Gelben und des Blauen zu gleicher Zeit haben, was wir dann als Grün bezeichnen, und ebenso können auch die Empfindungen des Roten und Violetten zusammenfallen, was dann die Empfindung des Purpurs gibt. Damit hätten wir die Empfindungen des ganzen Farbenkreises dargetan, dessen Abstufungen ins unendliche gehen können. Zum besseren Verständnisse veranschaulichen wir die Art der Wirkung des

Hellen und Dunkeln auf Zapfen und Stäbchen noch durch die nebenstehenden Zeichnungen.

Daß alle Farben tatsächlich nur aus der Empfindung des zu gleicher Zeit gesehenen Hintereinander von Hell und Dunkel entstehen, beweisen auch die von Professor Fechner in Leipzig bei Versuchen mit einer rotierenden schwarzweißen Scheibe (Fig. 16) bemerkten Farbenerscheinungen, die Herr Ingenieur Schwartze im Anhang zu seiner Molekularphysik beschreibt und dabei zur besseren Beobachtung derselben die Anwendung einer 12 bis 15 cm im Durchmesser habenden schwarzweißen Scheibe nach der Zeichnung Fig. 17 empfiehlt. Dreht man eine solche Scheibe mit entsprechender Geschwindigkeit in der Richtung des Pfeiles, so erscheinen die in den weißen Teil der Scheibe ein-

Fig. 16



Fig. 17



tretenden Kreisbögen blau in violett übergehend. Die Zwischenräume sehen wir heller blau, weil bei ihnen das Weiß länger auf unser Organ wirkt. Dagegen werden die in der Drehrichtung in den schwarzen Teil der Scheibe eintretenden Kreisbögen aus dem Dunkelzinoberroten ins Gelbe übergehend gesehen. An den von der schwarzen Hälfte beiderseits durch die weiße Fläche getrennten Kreisbögen aber treten beide Erscheinungen gleichzeitig auf, und je nach Umständen, ob das Helle oder das Dunkle vorherrscht, sieht man gelbe, grüne, purpurne oder auch bräunliche Farben. Herrscht das Dunkel vor, was bei zu langen Bögen der Fall ist, so erreichen die über dem Weißen entstehenden gelben Säume beiderseits den sich vom Weißen in das Schwarze hinein bildenden blauen Rand, was dann ein Grün gibt. Sind die schwarzen Bögen aber sehr kurz, und herrscht das beiderseitige

Helle vor, so erreicht der vom Weißen über dem Schwarzen entstehende violette Saum den vom Dunkel der Bögen, entgegen der Richtung des Pfeils, ins Weiße gehenden roten Rand und zeigt ein Purpur. Hiernach sehen wir auf einer in drehende Bewegung versetzten Scheibe nach Zeichnung Fig. 18 die grüne, nach Zeichnung Fig. 19 die purpurrote Farbe entstehen. Ist die Länge der Fig. 17 beiderseits von der schwarzen Scheibenhälfte getrennten Kreisbögen derart, daß beide Farben, Grün und Purpur bei entsprechender Drehungsgeschwindigkeit zu gleicher Zeit auftreten, so entsteht, wenn das Purpur ein wenig vorherrscht, eine braune Mischfarbe.

Es ist leicht einzusehen, wie sich durch die rasche Drehung der Scheibe das ursprüngliche Nebeneinander der darauf befindlichen schwarzen und weißen Bilder für unser Auge in ein Hintereinander von Hell und

Fig. 18



Fig. 19



Dunkel verwandelt, da das Organ die Bilder in so rascher Folge empfängt, daß es das vorauseilende Schwarz mit dem nachkommenden Weiß unter einer Empfindung als ein Dunkles über einem Hellen aufnimmt. Die äußeren in den weißen Teil der Scheibe (Fig. 17) eintretenden Kreisbögen sind infolgedessen blau und violett, weil der Eindruck des Hellen vor dem Dunkeln erfolgte, die Zwischenräume hellblau, weil bei ihnen das Weiß länger andauert. Bei den in der Drehungsrichtung in die schwarze Hälfte der Scheibe eintretenden Bögen aber folgt dem dunkeln Bilde ein helles, und man sieht deshalb ein ins Gelbe übergehendes Rot. Wir können auch, von dem Schwarz der Scheibenhälfte ausgehend, über der weißen Fläche bis zu den dunkeln Bögen, wenn diese lang genug sind, das Dunkel über dem Hellen und von einem Dunkel gefolgt, sehen, welche Folge sich von den Bögen zur schwarzen Scheibenhälfte nochmals wiederholt: es tritt dann beiderseits der gelbe Saum über den blauen Rand und bildet ein Grün.

Schwarze und weiße Bilder im Auge.

Sind die nervösen Elemente des Auges durch Belichtung in den Zustand der Erregung versetzt, so dauert der empfangene Eindruck je nach der Stärke des Reizes noch eine gewisse Zeit fort, ehe das Auge befähigt wird, einen anderen Eindruck aufzunehmen.

Sieht man einige Zeit scharf auf ein Fensterkreuz, das den Himmel zum Hintergrunde hat, und blickt dann gegen einen recht dunkeln Ort, oder man schließt das Auge, so bleibt der Eindruck des dunkeln Fensterkreuzes auf hellem Grunde noch eine ganze Weile in unserer Empfindung. Dieser Eindruck kehrt sich jedoch sofort um, wenn wir den Blick nachher gegen eine mäßig erleuchtete, also graue Fläche richten. Man sieht dann die vordem hellen Fensterscheiben dunkel, während das dunkle Fensterkreuz hell erscheint. Die Erklärung für diese Erscheinung ist sehr einfach. Die vorher durch das Helle der Scheiben in Erregung versetzten nervösen Elemente vermögen den von der mäßig erleuchteten Fläche ausgehenden Lichteindruck noch nicht wahrzunehmen und suchen in den Ruhezustand zurückzukehren, wobei sie uns die Empfindung des Dunkeln geben, während die vordem unter dem Eindrucke des dunkeln Fensterkreuzes im Zustande der Ruhe gewesenen Stäbchen und Zapfen den nun von der grauen Fläche auf sie wirkenden Lichtreiz sofort mit besonderer Empfindlichkeit aufnehmen und als ein Helles zu unserm Bewußtsein bringen.

Abklingen eines blendenden farblosen Bildes.

Wenn unser Organ ein blendendes farbloses Licht, wie das der Sonne, eines Azetylen- oder Magnesiumlichtes usw. aufnimmt, so verursacht dieses blendende Bild einen starken und lange andauernden Eindruck auf der Retina, und das Abklingen derselben wird von einer Farbenerscheinung begleitet. Es sind immer zwei Farben, die einander folgen, entweder Purpur mit nachkommendem Blau, oder Grün von Gelb gefolgt, und zwar entsteht Purpur und Blau, wenn sich das Auge nach Empfang des blendenden farblosen Bildes einem Dunkeln gegenüber befindet, Grün und Gelb, wenn nach dem blendenden farblosen Bilde dem Organ ein nur wenig beleuchtetes Helles oder Grau gegenübersteht. Die Farbenempfindung beginnt dabei stets am Rande des noch von

dem blendenden Bilde herrührenden Eindruckes, über dessen ganze Ausdehnung sie sich allmählich, gegen die Mitte fortschreitend, verbreitet, worauf die zweite Farbe, in gleicher Weise vom Rande ausgehend, folgt. Wie diese Farben entstehen, können wir aus dem über die Farbenempfindung durch Stäbchen und Zapfen auf S. 26 Gesagten ableiten. Diese nervösen Elemente befinden sich nach Empfang des von einem blendenden farblosen Bilde verursachten Eindruckes in dem Zustand äußerster Erregung. Wird ihnen nun unmittelbar nachher ein Dunkles geboten, so bleibt der Eindruck des hellen Bildes noch eine Zeitlang wirksam, bis sich die nervösen Elemente vom Rande aus gegen die Mitte des hellen Bildes herzustellen beginnen. Hierbei stehen Stäbchen und Zapfen beiderseits zugleich unter dem Eindrucke des gebotenen Dunkeln und des in der fortdauernden Erregung noch immer empfundenen Hellen. Dieser Zustand wirkt genau so, als wäre dem Auge ein Hintereinander von Hell, Dunkel, Hell geboten worden, denn in der Richtung, in welcher sich die durch den Reiz verlängerten Stäbchen und verkürzten Zapfen wiederherstellen, wird ihnen ja gar keine neue Anregung gegeben, die nervösen Elemente vermögen aber wegen der noch andauernden, sich nur allmählich lösenden Erregung trotzdem nicht in den Ruhezustand zurückzukehren und bringen hierdurch die Empfindung des Purpurnen zu unserem Bewußtsein. Dem Purpur folgt sodann, ebenfalls am Rande beginnend und gegen die Mitte fortschreitend, eine blaue Farbe, welche dadurch entsteht, daß die mehr geschützten, aber gerade deshalb gegen blendendes Licht besonders empfindsamen Zapfen längerer Zeit als die Stäbchen bedürfen, um in die Ruhestellung zurückzukehren. Diese noch fortdauernde Erregung in den Zapfen, währenddem die Stäbchen bereits hergestellt sind, wirkt wie ein dem Auge gebotenes Helles vor einem Dunkeln, als ein Blau. Wird dem Auge dagegen nach dem blendenden Bilde sogleich ein mäßig erleuchtetes Helles, ein Graues geboten, so bringt das Organ, statt des vorher fortwirkenden hellen Bildes, ein Dunkles zu unserem Bewußtsein, weil die im Zustande des höchsten Reizes befindlichen nervösen Elemente den Eindruck der grauen Fläche noch nicht aufzunehmen vermögen. Das vorschwebende dunkle Bild beginnt aber bald an seinen Rändern ein Grün zu zeigen, welche Farbe sich nach und nach über das ganze Bild verbreitet. Die Farbe zeigt sich zuerst am Rande, weil die nervösen Elemente dort stets weniger stark

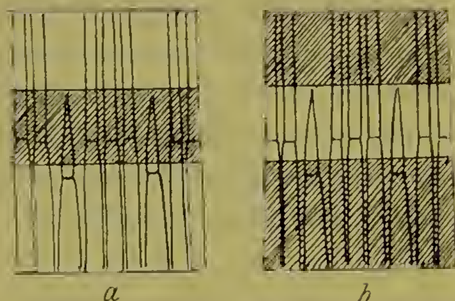
erregt werden als in der Mitte und sich deshalb auch rascher herzustellen vermögen, d. h. früher in die Lage ihres Ruhezustandes zurückkehren können. Hierbei beginnt aber gleichzeitig das von der grauen Fläche ausgehende Licht in ihnen wirksam zu werden, denn die sich herstellenden Stäbchen und Zapfen werden durch den neuen Eindruck teilweise daran gehindert, in den Ruhezustand zu gelangen. Die Stäbchen können sich nur in den Spitzen wiederherstellen, die Zapfen dagegen umgekehrt nur an ihrer Wurzel, da die Herstellungsrichtungen entgegengesetzte sind. Dieser Zustand ist nun genau derselbe, als wäre dem Auge ein Hintereinander von Dunkel, Hell, Dunkel geboten worden und wird auch als gleiche Empfindung, als Grün, zu unserem Bewußtsein gebracht. Hat das Grün sich über das ganze Bild verbreitet, so folgt ihm vom Rande aus in gleicher Weise gegen die Mitte fortschreitend, ein Gelb. Wie schon oben erwähnt, bedürfen die für grelles blendendes Licht empfindsameren Zapfen etwas längerer Zeit zu ihrer Herstellung als die Stäbchen, sie vermögen noch immer nicht den neuen von der sich darbietenden grauen Fläche ausgehenden Eindruck voll zu fassen, indessen sich die Stäbchen bereits angepaßt haben, und hierbei wird unserem Bewußtsein dieselbe Empfindung wie bei dem Hintereinander eines schwach Dunkeln vor einem Hellen, ein Gelb übertragen.

Farbige Bilder im Auge.

Bei der Betrachtung heller farbloser Bilder haben wir gefunden, daß das Organ, wenn ihm nach einem scharf wirkenden Bilde sofort ein Dunkles geboten wird, den empfangenen Eindruck noch einige Zeit festhält. Stellen wir dem Auge jedoch nach empfangenem Eindrucke ein nur ganz mäßig Erhelltes, ein Grau gegenüber, so empfinden wir an Stelle des vorher Hellen ein Dunkles, und zwar, wie schon oben gesagt, deshalb, weil der neue, aber schwächere Eindruck des Grauen auf die noch im gereizten Zustande befindlichen nervösen Elemente keinen diese weiter oder gleichstark wie der erstempfangene Eindruck erregenden Reiz ausübt, die vorher im Dunkeln gewesenen Stäbchen und Zapfen aber sofort und lebhaft durch das Graue angeregt werden, wobei sie dem Bewußtsein die Empfindung des Hellen übertragen. Wie sich nun die nervösen Elemente bei in der Empfindung fortwirkenden hellen Bildern, bei nachher dem Organ gebotenem Dunkel

oder bei einem Grauen verhalten, genau so verhalten sie sich auch farbigen Bildern gegenüber, und da jede Farbenempfindung durch ein Hintereinander von Hell und Dunkel entsteht, die Empfindung des Hellen und Dunkeln aber wechselt, wenn das Organ sofort nach Empfang des farbigen Bildes einer grauen Fläche gegenübergestellt wird, so ist es erklärlich, warum wir in solchem Falle stets den Eindruck der komplementären Farbe haben. Hat z. B. das Auge den Eindruck eines purpurroten Bildes aufgenommen, und wird ihm darauf sofort eine hellgraue oder mäßig beleuchtete weiße Fläche geboten, so erscheint auf dieser ein grünes Bild. Dasselbe entsteht dadurch, daß an Stelle des in dem Purpur (siehe Fig. 20a) empfundenen Dunkeln ein Helles tritt, wobei die von dem Purpur erregten Teile der Stäbchen und Zapfen keinen neuen Eindruck aufnehmen, sich vielmehr herzustellen suchen, währenddem die im Dunkeln gewesenen Teile sofort durch das Graue angeregt werden und diesen Gegensatz, wie aus Fig. 20b ersichtlich, lebhaft zu unserem Bewußtsein bringen. Aus genau der gleichen Ursache sehen wir grüne Bilder auf der hellgrauen Fläche purpurrot, gelbe violett, nach orangefarbenen Bildern blaue und umgekehrt.

Fig. 20



Am besten kann man die Erscheinung am Abend, wenn man eben erst Licht gemacht hat und das Auge, von der Dämmerung ausgeruht, besonders empfindlich ist, beobachten.

Farbige Schatten und verwandte Erscheinungen.

Farbige Schatten zu sehen hat man sehr oft Gelegenheit, und der Versuch, solche mit einem Kerzenlichte und einem zwischen dieses und das Tageslicht auf ein weißes Blatt Papier gestellten Bleistift hervorzurufen, dürfte allgemein bekannt sein.

Es zeigen sich dabei zwei farbige Schatten, einer von dem Tageslichte geworfen und von dem Kerzenlichte erhellt, gelb, und einer von dem Kerzenlichte geworfen und von dem Tageslichte beleuchtet, blau. Nachts lassen sich farbige Schatten auch durch zwei Kerzenlichter, von denen

man das eine durch ein farbiges Glas scheinen läßt, leicht hervorrufen; man sieht dann den von dem farbigen Lichte beleuchteten Schatten wie dieses Licht gefärbt, während der von dem farbigen Lichte geworfene Schatten die Komplementärfarbe zeigt. Wie diese Farbe entsteht, ist, nachdem wir uns mit den Funktionen unseres Auges vertraut gemacht haben, bald einzusehen. Werden einzelne Teile einer Fläche aus Ursache eines sich zwischen Licht und Fläche befindlichen Hindernisses schwächer als andere oder gar nicht beleuchtet, so entstehen Schatten. Sind gleichzeitig zwei Lichter wirksam, so können Doppelschatten entstehen, indem gewisse Stellen der Fläche immer nur von einem Lichte beleuchtet werden, während die übrige Fläche beide Lichter erhellen. Doch zeigen diese Schatten, solange farbloses Licht wirksam ist, keine Farbe, sie erscheinen uns je nach Beleuchtung dunkler oder heller grau. Die Farbenerscheinung tritt jedoch sofort auf, wenn eine der beiden Lichtquellen farbiges Licht aussendet. Zum Verständnisse, wie die sich dabei zeigenden Farben entstehen, müssen wir uns stets vergegenwärtigen, daß zwei Lichtquellen immer mehr Licht als nur eine geben und daß für unser Organ mehr Licht mit größerer Helligkeit gleichbedeutend ist. Da unser Auge nur zwischen Hell und Dunkel unterscheidet, so muß uns das hellere Objekt auch immer als das weißere erscheinen, weil wir ja das von einem Objekte nach allen Richtungen ausgestrahlte oder auch reflektierte ungefärbte Licht als Weiß bezeichnen. Wirken nun zwei Lichter, ein weißes (farbloses) und ein farbiges zusammen, so erhöhen sie ihre Helligkeit gegenseitig, und das Dunkel des farbigen Lichtes kommt nur noch schwach zur Geltung. Das weiße Licht für sich allein wirkt schwächer als das gesamte, und der von ihm beleuchtete, im Schatten des anderen Lichtes liegende Teil erscheint daher neben der von beiden Lichtern erhellten angrenzenden Fläche dunkler. Hierbei gewinnt aber das farblose Licht an der Stelle an Wirksamkeit dem farbigen Lichte gegenüber, an der dieses getrübt ist, und ein von ihm beleuchteter, von dem farbigen Lichte geworfener Schatten zeigt deswegen

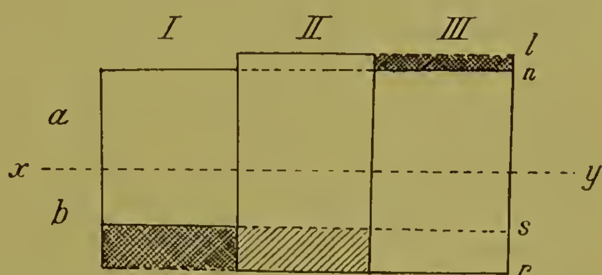


Fig. 21

die Komplementärfarbe. In Fig. 21 wird dieser Vorgang noch bildlich anschaulich gemacht. Im Zustande der Ruhe befinden sich die Enden der Stäbchen und Zapfen auf der Linie *xy*, und in erregtem Zustande bewegen sich erstere, sich verlängernd, vorwärts in die Hälfte *a*, letztere sich verkürzend rückwärts in die Hälfte *b*. Wirkt nun von einer beleuchteten Fläche gelbes Licht, etwa Kerzenlicht auf unser Organ, so ist das Verhalten in der Erregung der nervösen Elemente, wie bei *I* dargestellt, in den Stäbchen die Erregung größer als in den Zapfen, weil das Licht auf deren Seite durch ein Dunkel begrenzt ist. Kommt zu dem gelben Lichte noch ein weißes, so wird die Erregung in den nervösen Elementen erhöht, besonders in den Stäbchen, welche sich noch etwas über die dem gelben und weißen Lichte gemeinsame Erregungsgrenze verlängern. Die Zapfen werden gleichfalls stärker erregt, jedoch nicht über die Erregungsgrenze des weißen Lichtes, weil nach Seite *b* das Helle des gelben Lichtes schon früher durch ein Dunkel begrenzt ist. Dieses Dunkel wird nun zwar durch das weiße Licht erhellt, aber nur eben bis zu der Erregungsgrenze des weißen Lichtes für sich. Das ungefähre Verhältnis der Erregung in den Stäbchen und Zapfen bei Beleuchtung der Fläche durch beide Lichter ist in *II* angedeutet. Da nun diese durch beide Lichter bewirkte Beleuchtung viel heller ist als die des gelben und weißen Lichtes je für sich allein, so empfinden wir selbe, von der weißen Fläche reflektiert, neben dem Gelb des Kerzenlichtes als Weiß. Das eigentlich weiße, farblose Licht aber, dessen Wirkung wir in *III* darstellen, verliert für sich allein neben der doppelten Beleuchtung von *l* bis *n* und von *n* bis *s* an Helligkeit und nur in dem auf die Zapfen wirkenden Teile *s* bis *r* bleibt die Helligkeit, unverändert. Das weiße schwächere Licht macht deshalb neben dem durch doppelte Beleuchtung bewirkten helleren gelben, jedoch als weiß beurteilten Lichte den Eindruck eines blauen.

Die gleiche Farbenerscheinung, wie wir sie an den Schatten bei gleichzeitiger Beleuchtung einer weißen Fläche durch ein farbiges und ein weißes Licht beobachten können, entsteht auch, wenn ein weißes Licht von zwei übereinanderliegenden Flächen, einer farbigen und einer weißen, reflektiert wird, sobald sich die vor der farbigen befindliche weiße Fläche über ein neben oder in der farbigen Fläche befindliches Dunkel breitet. Man kann diesen Versuch sehr leicht mit einem farbigen Papiere, auf das man eine dunkle, graue oder schwarze Figur zeichnet,

machen, wenn man ein weißes Seidenpapier darüberlegt. Die dunkle Figur erscheint dann sofort in der Komplementärfarbe, bei einem gelben Papiere also blau, weil von der übrigen Fläche, genau wie bei den farbigen Schatten zweierlei Licht, einmal ein gelbes von einem gelben Papiere und einmal ein weißes von dem Seidenpapiere reflektiert wird. Dieser weiße und gelbe Reflex verstärkt sich gegenseitig und zeigt dem Auge ein helleres Gelb, neben dem das über der dunklen Figur für sich allein gesehene Weiß des Seidenpapieres als Blau empfunden wird, weil es erstens viel weniger hell als das von beiden Flächen reflektierte Licht ist und zweitens, weil es gegenüber dem weißgelben Lichte besonders auf der einen, die Stäbchen treffenden Seite, an Helligkeit verliert.

Farbenerscheinungen an Lichtbildern, welche neben einer Kante hinweg gesehen werden.

Goethe hat dieselben in die paroptischen Farbenerscheinungen eingereiht und meinte, daß dieselben dadurch entständen, daß die Feuchtigkeiten unseres Auges nur in der Mitte, wo das eigentliche Sehen vor sich geht, achromatisch seien, gegen die Peripherie aber eine chromatische Eigenschaft übrigbleibe. Wie wir jedoch gleich sehen werden, entsteht diese Farbenerscheinung ganz gesetzmäßig und unabhängig von den Augenfeuchtigkeiten.

Blickt man mit nach vorn geneigtem Kopfe nach oben schielend gegen ein sich in einiger Entfernung befindendes Licht, so erscheint uns dasselbe oben rot in gelb, unten blau in violett übergehend gesäumt. Legt man den Kopf zurück, nach unten auf das Licht blickend, so zeigen sich die farbigen Säume in umgekehrter Folge, unten rot nach innen gelb, oben blau nach außen violett werdend. Die Ursache dafür, daß uns bei dem Vor- und Zurückbeugen des Kopfes Farben erscheinen, ist die, daß einmal durch den Augenbogen und einmal durch die Wange ein Teil der Pupille beschattet wird. Man kann genau dieselbe Wirkung wie durch das Beugen des Kopfes verursacht, auch erzielen, wenn man während der Betrachtung eines Bildes ein Blatt Papier so vor das Auge hält, daß ein Teil der Pupille dadurch bedeckt wird. Auf diese Weise kommt das betrachtete Bild nur von der einen Hälfte der Linse auf die Netzhaut, und da wir jeden Punkt des Bildes von

jeder Stelle der Netzhaut, sowohl von den sich rückwärts bewegenden Zapfen als auch von den sich vorschiebenden Stäbchen aus, stets in dem Schnittpunkte des einfallenden Lichtstrahles und der von der getroffenen Netzhautstelle aus durch die Linsenmitte gedachten Geraden sehen, so erscheint das Bild vervielfältigt und übereinandergeschoben, und wir sehen dort, wo ein Helles über einem Dunkeln empfunden wird und umgekehrt, gemäß unseren früheren Ausführungen die entsprechenden Farben. Fig. 22 soll dazu dienen, diesen Vorgang anschaulich zu machen. Die Linse *L* ist durch ein Blatt Papier *Bl* derart bedeckt, daß die von dem Bilde *AB* kommenden Lichtstrahlen, um ein Bild auf der Netzhaut *N* zu entwerfen, nur bei *o* in das Auge gelangen können. Dieses auf die Netzhaut übertragene Bild wäre *ab*, von dem aus die durch den Mittelpunkt der Linse *m* gezogenen Geraden, die bei *o* in das Auge kommenden Strahlen in *AB* schneiden müssen. Infolge der Anordnung von sich in erregtem Zustande in verschiedener Richtung bewegenden Empfindungselementen, den Stäbchen und Zapfen, und der damit verbundenen Fähigkeit unseres Organs ein Hintereinander wahrzunehmen, bewirken die einfallenden Lichtstrahlen nicht nur die Empfindung eines Bildes in *ab*, sondern die Empfindung eines von *a' b'* bis *a'' b''* reichenden Hintereinanders des gleichen Bildes, das sich nach außen als wie von *A' B'* bis *A'' B'''* kommend projeziert. Da hierbei zugleich auf der einen Seite wohl die Zapfen, nicht aber die Stäbchen, auf der andern Seite umgekehrt die Stäbchen, nicht aber zugleich die Zapfen beleuchtet oder in Erregung versetzt werden, so haben wir die Empfindung von Farben, und zwar sehen wir im ersteren Falle *d* bis *c* (*A'* bis *A''*) das Helle über dem Dunkeln in allen Schattierungen von violett bis blau, im zweiten Falle von *e* bis *f* (*B'* bis *B''*) das Dunkel vor dem Hellen in allen Übergängen von gelb bis rot.

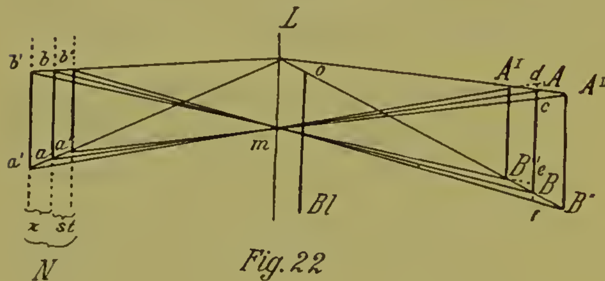


Fig. 22

Die Farbenblindheit.

Diese ist teils auf Mängel im Bau der Empfindungselemente, teils auf krankhafte Zustände derselben zurükzuführen, und es lassen sich

drei verschiedene Arten von Farbenblindheit unterscheiden: die totale Farbenblindheit, die Blaugelbblindheit und die Rotgrünblindheit.

Bei der totalen Farbenblindheit erscheint das Spektrum farblos, ist bei Grün am hellsten und wird nach beiden Seiten dunkler. Bei der Blaugelbblindheit besteht das Spektrum nur aus den Farben Rot und Grün, die blauviolette Seite ist stark verkürzt bzw. dunkel. Der Rotgrünfarbenblinde empfindet im Spektrum nur die Farben Gelb und Blau, die Empfindung für Rot und Grün fehlt, und im Spektrum stößt das Gelb direkt an das Blau. Die rote Seite ist verkürzt bzw. erscheint ungefärbt oder dunkel.

Aus dem früher Gesagten wissen wir, daß unser Auge durch die Eigenschaften der Stäbchen und Zapfen, sich in erregtem Zustande vorzuschieben bzw. zurückzuziehen, sich zu verlängern oder zu verkürzen, befähigt ist, das Hintereinander von Hell und Dunkel wahrzunehmen und dieses Hintereinander als Farbenempfindung zu unserem Bewußtsein zu bringen.

Bei der Farbenblindheit fehlt nun die Empfindung der Farbe teilweise oder ganz, und hieraus läßt sich schließen, daß die Farbenblindheit ihre Ursache in einem Unvermögen der Stäbchen und Zapfen hat, sich bei Belichtung zu verlängern bzw. zu verkürzen, wodurch dieselben wohl noch befähigt sind, ein Nebeneinander, nicht aber mehr, ein Hintereinander von Hell und Dunkel zu erfassen und zu übertragen. Erstreckt sich diese Bewegungsunfähigkeit auf beide Arten nervöser Elemente unseres Auges, auf Stäbchen und Zapfen, so kann ein Hintereinander von Hell und Dunkel überhaupt nicht mehr wahrgenommen werden, die Bilder zeigen nur noch das Nebeneinander von Hell und Dunkel etwa wie eine Photographie und ohne jede Färbung. Die Farbenblindheit ist eine totale.

Trifft die Bewegungsunfähigkeit die Zapfen allein, so entsteht Blaugelbblindheit, und das Spektrum ist auf der blauvioletten Seite stark verkürzt.

Bei gehinderter Bewegungsfähigkeit der Stäbchen erscheint das Spektrum auf der roten Seite verkürzt oder dunkel, und es entsteht Rotgrünblindheit. Hier sei schließlich noch erwähnt, warum die Netzhautmitte so reich an Zapfen ist, während nach außen die Zahl dieser Elemente im Gegensatze zu den Stäbchen rasch abnimmt. Es hat

diese Anordnung ihren Grund in der Krümmung des Augenhintergrundes und bezweckt, das durch die Krümmung gestörte Verhältnis der Empfindung aus den Stäbchen und der Empfindung aus den Zapfen wieder ins Gleichgewicht zu bringen; denn wäre die Verteilung der nervösen Elemente überall egal, so würden Farbenerscheinungen auftreten, weil infolge der Krümmung des Augenhintergrundes in der Mitte *a*, siehe Fig. 23, die Stäbchen, an den Rändern *b* aber die Zapfen mehr in die Ebene der von der Linse entworfenen Bilder zu liegen kämen, wodurch hier Blau, dort Rot gesehen würde.



Fig. 23

Farbenerscheinung durch ein Gitter hervorgerufen
(sogenannte Beugungserscheinung).

Bis hierher haben wir das Farbenband oder Spektrum nur als prismatische Erscheinung kennen gelernt und wollen uns nun mit der gleichen Erscheinung durch ein Gitter hervorgerufen befassen.

Unter Gitter verstehe man einen Rahmen, der mit ganz feinen, in engen, aber überall gleichen Abständen voneinander befindlichen Drähten bespannt ist, auch eine berußte Glasplatte, auf welcher mittels einer Teilmaschine ganz feine, zueinander parallele Linien gezogen sind (Rußgitter), oder eine Glasplatte, auf welcher solche Linien eingeritzt sind. Auch eine geritzte, spiegelnde Metallplatte zeigt die gleiche Erscheinung. Man nennt derartige Gitter auch Reflexionsgitter.

Wie man sich die Entstehung der Farbenerscheinung an solchen Gittern denkt, haben wir schon einmal bei Widerlegung des sog. mathematischen Beweises mitgeteilt. Auch haben wir dort bereits darauf hingewiesen, daß wir diese Farbenerscheinung auf eine fortschreitende Reflexion zurückführen, welche Anschauung wir nun genauer ausführen wollen. Dabei muß in erster Reihe der Umstand ins Auge gefaßt werden, daß die auffallenden Lichtstrahlen von dem mit Drähten bespannten Rahmen oder dem geritzten Glas oder den Metallplatten nicht nur in einer Richtung, sondern senkrecht zu den Drähten oder eingeritzten Linien nach allen Richtungen reflektiert werden, denn wir müssen uns vergegenwärtigen, daß der Querschnitt der Drähte kreisförmig ist, und daß auch die geritzten Linien eines Glas- oder Metallgitters

mehr oder weniger halbkreisförmige Ein- und Ausbiegungen auf solchen Flächen bilden, so daß sich ein darauffallendes Bild von jedem Draht oder von jeder Linie des Gitters nach vielen Richtungen spiegelt.

Von dieser Ansicht geleitet, finden wir, daß die Punkte A und B in nebenstehender Zeichnung, sobald die von denselben ausgehenden Lichtstrahlen, noch ehe sie uns von dem Gitter reflektiert werden, sich kreuzen, uns als ein Hintereinander von A'' und B' erscheinen müssen. Genau wie einzelne Punkte verhalten sich natürlich auch Bilder, und wir sehen auch hier nach dem bekannten Gesetze Helles über dunklem Grunde violett bis blau, Dunkles über hellem Grunde gelb bis rot. Fig. 25 zeigt, wie die gleiche Farbenerscheinung, durch das Hintereinander von Hell und Dunkel veranlaßt, bei Reflexionsgittern entsteht.

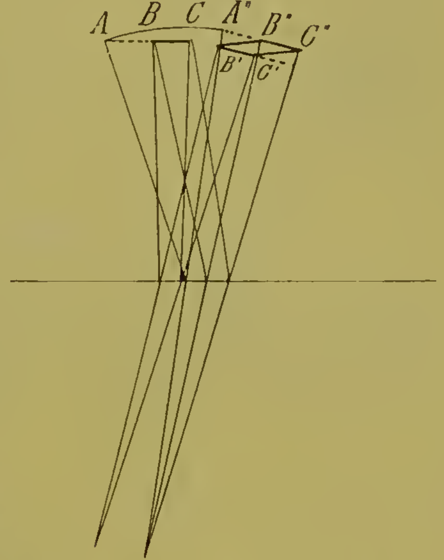


Fig. 24

Wie die Bilder 2., 3. Ordnung usw. entstehen, deuten wir in Fig. 26 an. Die von b ausgehenden Lichtstrahlen sehen wir von b' bis b''

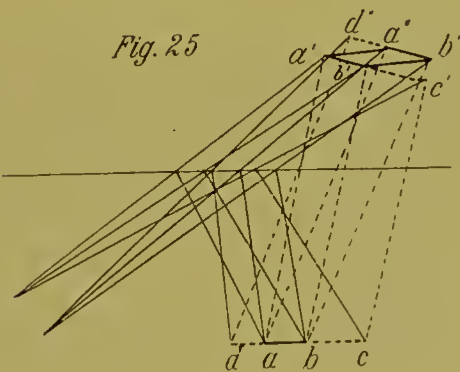


Fig. 25

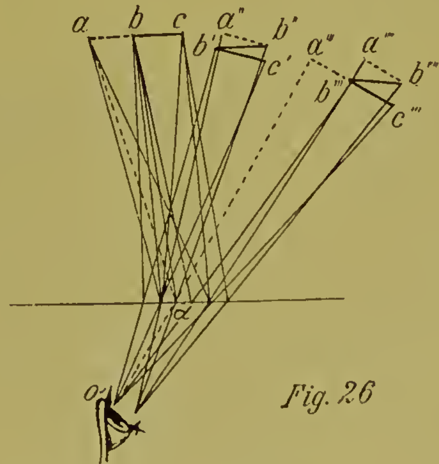


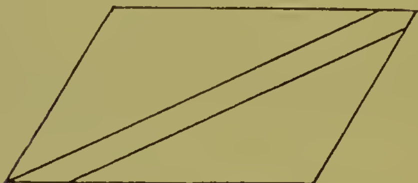
Fig. 26

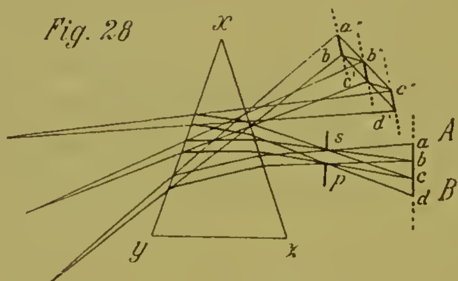
verschoben. Von d aus wird uns aber nicht nur b reflektiert, sondern es spiegeln sich dort auch alle Punkte von b nach a, soweit die Öffnung der Pupille dieselben zu fassen vermag, und der letzte, von d aus reflektierte, bei o in das Auge kommende Punkt ist zugleich der Anfang der Bilder 2. Ordnung. Die Bilder und somit Farben 3. Ordnung usw.

erscheinen in der gleichen Weise. Die objektive Erscheinung ist auch hier genau wie bei den Prismen die von der rauhen Fläche resp. den einzelnen Punkten derselben reflektierte subjektive Farbenerscheinung, wovon wir uns leicht überzeugen können, wenn wir an Stelle der rauhen Fläche, die wir, wie schon mitgeteilt, aus lauter kleinen Hohlspiegeln bestehend auffassen, einen Planspiegel setzen. Das subjektive Bild erscheint uns dann nur in einer bestimmten Richtung und nicht mehr auf, sondern hinter der spiegelnden Fläche.

Bilder durch enge Spalten gesehen.

Dadurch, daß man weißes Licht durch möglichst enge Spalten scheinen läßt, man sagt, nur einen Strahl weißen Lichts hindurchläßt und diesen dann mittels eines Prismas ohne weiteres in ein Farbenband umwandeln

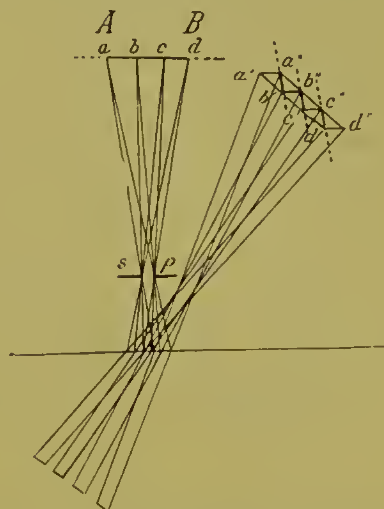

Fig. 27



kann, will man den Beweis geliefert haben, daß weißes Licht aus farbigen zusammengesetzt sei und sich in solches zerlegen lasse. Wir werden jedoch gleich sehen, daß auch hier wieder ein Übereinander von Bildern und ein Hintereinander von Licht und Nichtlicht, Hell und Dunkel die Farbenerscheinung wirkt. Was man erreicht, indem man Bilder durch enge Spalten den Prismen zugehen läßt, ist eine Verbreiterung der Farbenerscheinung und das Sichtbarwerden aller einzelnen Farbentöne, denn es werden dabei immer nur Teile des hintereinandertretenden, vervielfältigten Bildes, und zwar als ein vom Dunkel begrenztes Band, quer in der Diagonale des sonst gesehenen Hintereinanders sichtbar.

Fig. 28 zeigt uns, wie dieses Farbenband entsteht. Durch das Prisma xyz wird das durch den Spalt sp kommende Bild AB gesehen, und zwar in Teilen ab, bc usw., die sich bei $a''b'$, $b''c'$ hintereinander ordnen und auf beiden Seiten von dem durch den Spalt verursachten Dunkel begrenzt

werden. Ein Gitter zeigt ein gleiches Farbenband wie ein Prisma, wenn Bilder, durch enge Spalten kommend, durch ein solches beobachtet werden. Der Bezug des Lichtes ist in Fig. 29 dargestellt. Die einzelnen Teile *a b*, *b c* des Bildes *A B* zeigen sich als ein Farbenband bei *a″ b′*, *b″ c′*.



Wir haben uns nun sowohl mit der Ursache der Farbenerscheinungen durch Prismen und Gitter hervorgerufen, wie auch mit den Funktionen unseres Sehorganes vertraut gemacht und wollen uns hier noch ein wenig mit dem bisher nicht enthüllten Geheimnis der Fraunhoferschen Linien befassen. Goethe schrieb diese Linien den sich im Spalte kreuzenden Halblichtern zu. Wahrscheinlich hat es ihm an geeigneten Instrumenten gefehlt, um diese Erscheinung selbst beobachten zu können.

Die Fraunhoferschen Linien,

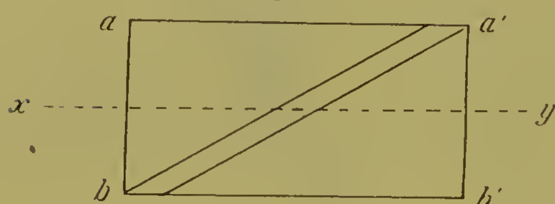
so benannt nach dem Optiker J. Fraunhofer aus München, der sie zuerst beobachtete und darauf aufmerksam machte, sind senkrechte, dunkle Linien im Sonnenspektrum, deren hauptsächlichste man mit *A* bis H_2, am roten Ende beginnend, bezeichnet hat. Sie bilden in dem Farbenbande gleichsam eine natürliche Skala, die man zum Vergleiche mit Spektren aus anderen Lichtquellen benutzen kann.

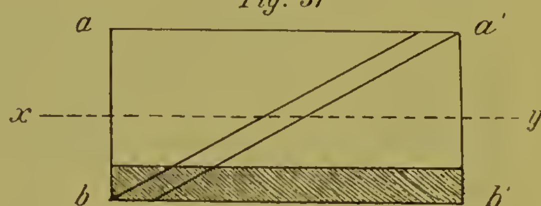
Weißglühende Körper, ebenso die Flammen der Lampen-, Kerzen- und Gaslichter, in denen glühende Kohlenstoffteilchen verbrennen, geben kontinuierliche Spektren. Glühende Gase dagegen zeigen Linienspektren, aus hellen Linien auf dunklem oder nur schwach leuchtendem Grunde bestehend, deren Lage und Anordnung zueinander für die chemische Beschaffenheit des betreffenden Gases bezeichnend ist.

Den Physikern Bunsen und Kirchhoff danken wir es, die Spektralanalyse, gestützt auf diese Beobachtung, zu einer äußerst wertvollen Untersuchungsmethode ausgebildet zu haben. Kirchhoff fand auch, daß sich die hellen Linien eines Gases in dunkle umkehren, z. B. die helle gelbe Linie des Natriums sich in eine dunkle verwandelt, sobald man

dasselbe zwischen dem Auge und einem Lichte befindlich, das für sich allein ein kontinuierliches Spektrum gibt, beobachtet.

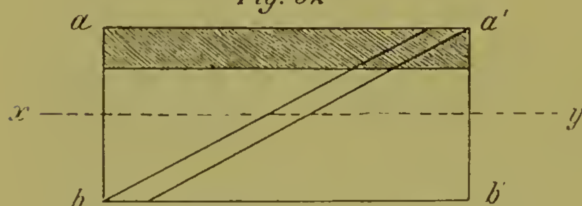
Es wurde bereits früher erläutert, daß wir das Hintereinander von Hell und Dunkel und damit zugleich Farbe durch die Anordnung zweier in gereiztem Zustande sich in entgegengesetzten Richtungen bewegenden Elemente der Netzhaut, der Stäbchen und Zapfen, empfinden. Reines weißes Licht erregt sowohl die Stäbchen wie auch die Zapfen gleichmäßig ohne jede Unterbrechung, und deshalb muß auch das Spektrum

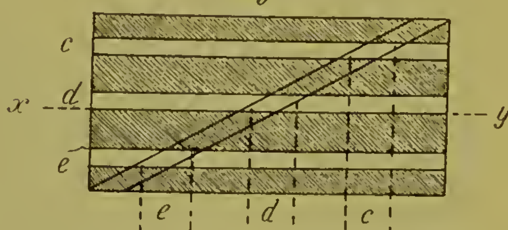




solchen Lichtes alle Farbentöne ohne Unterbrechung von Rot bis Violett zeigen.

Ein Spektrum von rotem Lichte dagegen wird an dem blauen, ein solches von blauem Lichte am roten Ende verkürzt sein, weil bei rotem



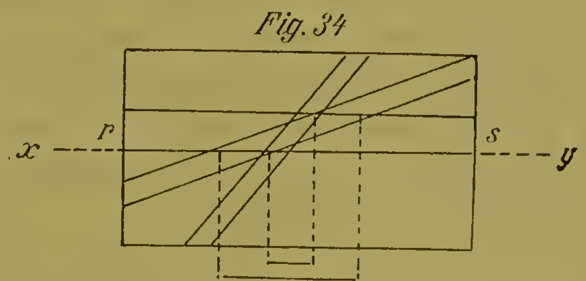


Lichte die Zapfen, bei blauem Lichte die Stäbchen ein Dunkel in ihrer Bewegungsrichtung empfinden.

Fig. 30 soll veranschaulichen, wie ein weißes Licht wirkt. Die Stäbchen und Zapfen werden sich, sobald weißes Licht auf sie fällt, von der Linie *xy*, auf der sie sich im Zustande der Ruhe befinden, erstere nach *a*, letztere nach *b* verlängern und vorschieben bzw. sich verdicken und dabei verkürzen. Es wird deshalb ein von weißem Lichte entworfenes Spektrum in der Diagonale von *b* bis *a'* in allen Farbentönen von Violett bis Rot sichtbar sein.

Wirkt rotes Licht auf das Sehorgan, so wird die Seite, in deren Richtung sich die Zapfen verkürzen, durch ein Dunkel begrenzt, wie in Fig. 31 angedeutet, bei *b* und *b'*, und muß natürlich auch ein Spektrum von solchem Lichte auf dieser Seite, also an seinem blauen Ende bei *b* verkürzt gesehen werden. Bei blauem Lichte (Fig. 32) wirkt die Begrenzung des Hellen durch ein Dunkel auf die Stäbchen, und daher ist ein Spektrum davon an dem roten Ende bei *a'* verkürzt.

Auch glühende oder brennende Gaſe erscheinen dem Auge in ihrer charakteristischen Farbe. Sie zeigen, da Farbe immer ein Hintereinander von Hell und Dunkel bedingt, und da bei ihnen das Dunkel vorherrscht, im Spektroskop Linien, und zwar dort, wo das Helle die dem durch das Spektroskop kommenden Lichte allein zugängige Diagonale schneidet, in unserer Fig. 33 bei *c*, *d* und *e*. Die zwischen diesen hellen Linien liegenden Stellen bleiben dunkel, weil dort kein Reiz auf die Empfindungselemente der Netzhaut wirkt.



Wird nun das Linienspektrum eines Gases vor dem Spektrum eines hellen weißen Lichtes gesehen, so wirkt sein mattes Licht auf dieses verdunkelnd wie ein trübes Mittel, und die im Spektroskop vorher hell gesehenen Linien derselben verwandeln sich in dunkle, weil die uns früher hell erschienenen Stellen im Verhältnisse zu dem nun zu gleicher Zeit wirksamen weißen Lichte dunkel erscheinen und neben diesen so empfunden und zu unserem Bewußtsein gebracht werden.

Durch Anwendung einer entsprechend größeren Anzahl von Prismen kann man die ursprünglich hellen, auf einem kontinuierlichen Spektrum dunkel gesehenen Linien auch wieder in helle zurückführen. Das Spektrum wird dabei stark verbreitert, und der sichtbare diagonale Schnitt der hintereinander gesehenen Bilder ist nur wenig geneigt. Die Stelle, wo der Lichtstreifen, in Fig. 34 *rs*, der vordem dunkel gesehenen Linie diese Diagonale schneidet, wird dabei ebenfalls breiter, wirkt infolgedessen auch auf mehr Empfindungselemente der Netzhaut ein und wird aus diesem Grunde nach innen wieder als helle Linie empfunden. Da bei der geringen Neigung der beleuchteten Diagonale deren Tiefe immer

geringer wird, muß man, um den Lichteindruck zu empfinden, den Spalt entsprechend öffnen.

Bei Lichtquellen, deren Spektren Linien zeigen, wie z. B. der Sirius und andere Fixsterne, hat man Verschiebungen der Spektrallinien beobachtet, wenn sich diese Lichtquellen näherten oder entfernten, und zwar bemerkt man im ersteren Falle eine Verschiebung der Linien nach dem blauen, im letzteren Falle eine Verschiebung nach dem roten Ende des Spektrums hin. Der Grund hierfür ist wohl in der Farbenänderung des Lichtes zu suchen, die sich bemerkbar macht, wenn sich das Licht von uns entfernt, oder sich uns nähert, weil sich dabei die Masse, die sich zwischen das Auge und das wirksame Licht stellt, mehrt oder mindert. Es wird, wenn es sich entfernt, röter, und die betreffenden Linien verschieben sich nach dem roten Ende, und es wird heller oder weißer, wenn es sich nähert, wobei die Linien seines Spektrums sich nach dem blauen Ende hin verschieben.

Wir erkennen auch hier, daß das Spektrum das Verhältnis im Hintereinander von Hell und Dunkel der durch ein Spektroskop gesehenen Farben darstellt und nicht, wie man bisher immer annahm, ein durch Brechbarkeit und Schwingungszahl bedingtes Nebeneinander aufgedrieselter Lichtstrahlen.

Indem ich diese Arbeit, die ich auf das Notwendigste und Wichtigste beschränkt habe, in die Öffentlichkeit bringe, hoffe ich damit zugleich der Goetheschen Farbenlehre gedient zu haben. Der Grundgedanke hier wie dort ist derselbe. Wohl hätte manches in der vorliegenden Arbeit ausführlicher und breiter behandelt werden können, doch glaube ich es bei aller Knappheit an Deutlichkeit nicht haben fehlen zu lassen. Mit Absicht habe ich es unterlassen, aller der verschiedenen Versuche, die schon in den zahlreichen dieses Thema behandelnden Werken, am besten in der Goetheschen Farbenlehre, aufgeführt sind, nochmals Erwähnung zu tun.

Was Goethe vergebens erstrebte, die Anerkennung seiner Lehre, daß alle Farben durch ein Hintereinander von Hell und Dunkel entstehen, hoffe ich mit dieser Schrift zu erreichen und empfehle dieselbe einer wohlwollenden Aufnahme.
